

# Großtechnische Versuchsanlage zur Phosphor-Rückgewinnung auf dem Klärwerk Göppingen



**EFRE Proj. Nr. 1011530**

## Sachbericht

### Teil 1: Anlagentechnik

Im Auftrag der

Stadtentwässerung Göppingen - SEG  
Im Bulach 5  
73035 Göppingen

erstellt von

iat - Ingenieurberatung GmbH  
Friolzheimer Str. 3A  
70499 Stuttgart  
Tel: 0711-814775-0  
Fax: 0711-814775-11  
[info@iat-stuttgart.de](mailto:info@iat-stuttgart.de)

März 2023

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	6
2	Klärwerk Göppingen .....	7
2.1	Schmutzfrachtbelastung .....	7
2.2	Abwasserreinigung / P-Elimination .....	7
2.3	Schlammbehandlung .....	7
3	MAP-Versuchsanlage Göppingen .....	8
3.1	Konzeption der MAP-Versuchsanlage .....	8
3.2	Thermo-chemische Desintegration von Überschussschlamm / Pondus-Verfahren .....	8
3.2.1	Hintergrund .....	8
3.2.2	Verfahren .....	9
3.2.3	Auslegung .....	10
3.3	Milde saure Hydrolyse von Faulschlamm (Vorversäuerung) .....	11
3.3.1	Hintergrund .....	11
3.3.2	Verfahren .....	13
3.4	MAP-Fällung / AirPrex-Verfahren .....	13
3.4.1	Hintergrund .....	13
3.4.2	Verfahren .....	13
3.4.3	Auslegung .....	16
3.5	Gesamtkonzeption .....	16
3.6	Einbindung in den Kläranlagenbestand / Standorte .....	18
3.6.1	Pondus-Anlage .....	18
3.6.2	MAP-Reaktor (AirPrex-Reaktor) .....	18
3.6.3	Chemikalienbehälter .....	19
3.7	Abbruch- und Baumaßnahmen 2019 .....	19
4	Betrieb der MAP-Anlage .....	21
4.1	Betriebsprobleme / Nachrüstungen .....	22
4.1.1	Desintegration Überschussschlamm / Pondus-Anlage .....	22
4.1.2	Vorversäuerung (saure Hydrolyse) .....	25
4.1.3	MAP-Fällung .....	27
4.1.4	Anlagenbetreuung .....	32
5	Betriebswerte nach Flow Chief (2021, 2022) .....	33
5.1	Desintegration / Pondus .....	33
5.2	Vorversäuerung (saure Hydrolyse) .....	35
5.3	MAP-Fällung (AirPrex) .....	35
5.4	Chemikalienverbräuche .....	38

5.5	Stromverbräuche.....	40
5.6	MAP-Ausbeute.....	40
6	Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb .....	42
6.1	Datenerfassung / Betriebstagebuch .....	42
6.2	Kennzahlen Faulschlamm .....	43
6.3	Faulgasmenge .....	44
6.4	Faulgas im Jahresgang .....	45
6.5	Faulgasnutzung.....	45
6.6	Entwässerter Klärschlamm (zur Entsorgung).....	46
6.7	Rückbelastung Belebungsanlage (PO <sub>4</sub> -P im Filtrat) .....	47
6.8	P-Gehalt im Klärschlamm zur Entsorgung.....	49
7	Zusammenfassung.....	50
8	Fazit und Ausblick .....	53

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema Pondus-Verfahren.....	10
Abbildung 2: Pondus-Anlage (3D-Ansicht) .....	11
Abbildung 3: Löslichkeit von Metallphosphaten in Abhängigkeit vom pH-Wert (ATV, 1985) .....	12
Abbildung 4: MAP-Anlage (3D-Ansicht).....	15
Abbildung 5: Ablufführung der MAP-Anlage (3D-Ansicht) .....	15
Abbildung 6: Übersichtschaubild MAP-Anlage Göppingen.....	17
Abbildung 7: Lageplan der MAP-Anlage auf der Kläranlage Göppingen.....	19
Abbildung 8: Herrichten der Trocknerhalle für die MAP-Anlage (März 2019).....	20
Abbildung 9: Einbringen der Pondus-Anlage ins Maschinengebäude (Mai 2019).....	20
Abbildung 10: Anlieferung des AirPrex-Reaktors (Juli 2019).....	20
Abbildung 11: Einbringen des AirPrex-Reaktors in die MAP-Halle (Juli 2019).....	21
Abbildung 12: „Sommerloch“ auf der KA Göppingen 2019 für die Parameter Schmutzfracht Zulauf Kläranlage, ÜS-Schlammmenge und Aufenthaltszeit Faulung (Jahresbericht 2020 JuP, Betriebsdatenauswertung iat) .....	23
Abbildung 13: Reaktionstemperatur im Pondus-Reaktor (Stichproben, Fotodokumentation).....	24
Abbildung 14: Heizwassertemperatur im Zulauf der Wärmetauscher (Stichproben, Fotodokumentation).....	25
Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Schwefelwasserstoff-Konzentrationen im Abgas des Ansäuerungsbehälters im Verlauf der Vorversäuerung (Bericht EMS) .....	26
Abbildung 16: Zulauf MAP-Anlage (Stichproben, Fotodokumentation) .....	27
Abbildung 17: Verzopfungen in der MAP-Anlage durch Störstoffe im Faulschlamm.....	28
Abbildung 18: Ablagerungen in der Faulschlammleitung zum MAP-Reaktor mit weißen MAP-Kristallen.....	29
Abbildung 19: Aufstellen des Aggregats zur Schlammsiebung (April 2022) .....	30
Abbildung 20: Hydrozyklon auf dem MAP-Reaktor (Juli 2022) .....	32
Abbildung 21: Jahresgang 2021 für Q, T, NaOH (Pondus-Anlage, Flow Chief).....	34
Abbildung 22: Jahresgang 2022 für Q, T, NaOH (Pondus-Anlage, Flow Chief).....	34
Abbildung 23: Dosierung von H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaOH und MgCl <sub>2</sub> (AirPrex-Anlage, Flow Chief 2021) .....	35
Abbildung 24: Gehalt an gelöstem Phosphat in Faulwasser und Filtrat KFP bei Betrieb der MAP-Anlage (Laborwerte SEG, 2019) .....	36
Abbildung 25: Betriebsparameter der MAP-Anlage im Jahresgang 2021 (Flow Chief) .....	37
Abbildung 26: Betriebsparameter der MAP-Anlage im Jahresgang 2022 (Flow Chief) .....	37
Abbildung 27: Phosphatgehalt im Filtrat der Kammerfilterpresse 2022 (Eigenkontrolle SEG) .....	38
Abbildung 28: Struvit (MAP) im Abwurfcontainer und typische Sargdeckelform unter dem Mikroskop.....	41
Abbildung 29: Faulgasproduktion im Jahresgang 2019 – 2021 (Jahresbericht 2021, JuP) .....	45
Abbildung 30: Phosphatgehalt (PO <sub>4</sub> -P) im Filtrat der Kammerfilterpresse (2011-2020).....	47
Abbildung 31: Phosphatgehalt (PO <sub>4</sub> -P) im Filtrat der Kammerfilterpresse 2021 (Labor SEG) .....	48
Abbildung 32: Phosphor-Gehalt im entwässerten Klärschlamm zur Entsorgung (Entwicklungsbericht, JuP, ergänzt durch iat) .....	49

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenblatt Pondus-Anlage Göppingen.....	10
Tabelle 2: Rücklöseversuche mit Göppinger Faulschlamm (ISWA 2020 / 2021) .....	12
Tabelle 3: Datenblatt MAP-Anlage .....	16
Tabelle 4: Spezifische Chemikalienverbräuche bei Vorversäuerung (2021, 2022) .....	39
Tabelle 5: Jahresverbräuche an Chemikalien bei Betrieb mit Vorversäuerung (Hochrechnung) ..	39
Tabelle 6: Jahresstrombedarf Pondus- und MAP-Anlage 2022.....	40
Tabelle 7: Betriebsdaten zur Faulung (Entwicklungsbericht 2012-2021, JuP) .....	43
Tabelle 8: Kennzahlen zum Faulgasanfall (Entwicklungsbericht 2012-2021, JuP) .....	44
Tabelle 9: Betriebsdaten zur Faulgasnutzung (Entwicklungsbericht 2012-2021, JuP) .....	46
Tabelle 10: Entwässerter Klärschlamm zur Entsorgung (Jahresbericht 2021, JuP).....	46
Tabelle 11: Mittlere Phosphatgehalte im Filtrat der Kammerfilterpresse (Entwicklungsbericht JuP) .....	48
Tabelle 12: Phosphor-Gehalt im entwässerten Klärschlamm zur Entsorgung (Entwicklungsbericht, JuP, ergänzt durch iat).....	49

## Abkürzungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
β-Faktor	Stöchiometrie-Faktor
BHKW	Blockheizkraftwerk
Bio-P	vermehrter biologischer Phosphor-Elimination
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EFRE	Europäischen Fonds für regionale Entwicklung
EMS	Abteilung am ISWA: Lehrstuhl für Abfallwirtschaft und Abluft. Emissionen, Gerüche, Lasergestützte Verfahren, Methanemissionen
EPS	extrazellulären polymere Substanzen
EW	Einwohnerwerte
FB	Faulbehälter
FK	Filterkuchen
FS	Faulschlamm
ISWA	Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft
JuP	Ing. Büro Jedele und Partner
KFP	Kammerfilterpresse
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit)
MÜSE	Maschinelle Überschussschlammendickung
NED	Nacheindicker
SEG	Stadtentwässerung Göppingen
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt
ÜS	Überschussschlamm
WS	Wirksubstanz
WT	Wärmetauscher

## 1 Einleitung

Die Kläranlage Göppingen mit einer Ausbaugröße von 330.000 EW und einer mittleren Belastung von gerundet 220.000 EW<sub>CSB</sub>, ist eine der zehn größten Kläranlagen in Baden-Württemberg. Sie liegt, räumlich begrenzt, zwischen der B10 und der Fils im Großraum Stuttgart, am Rande der Schwäbischen Alb.

Die Stadtentwässerung Göppingen (SEG) beschäftigt sich bereits seit 2014 mit dem Thema der Phosphor-Rückgewinnung (P-Rückgewinnung) aus Klärschlamm, um die Mitverbrennung im Zementwerk auch nach Inkrafttreten der P-Rückgewinnungspflicht im Jahr 2029 gemäß Klärschlammverordnung (AbfKlärV) fortsetzen zu können.

Vor diesem Hintergrund wurde 2019 mit finanzieller Unterstützung des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE, Aktenzeichen Phosphor\_1011530) und Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg eine Versuchsanlage zur P-Rückgewinnung aus Faulschlamm auf der Kläranlage errichtet.

Ziel der bestehenden Versuchsanlage ist es, den vergleichsweise geringen Phosphorgehalt (P-Gehalt) im Klärschlamm von im Mittel 25 g P/kg TM auf der Kläranlage unter den Schwellenwert von 20 g P/kg TM zu senken.

In der bestehenden Versuchsanlage wurde eine Verfahrenskombination aus technisch einfachen, bewährten Techniken umgesetzt, um

- die Einzelkomponenten platzsparend in den Kläranlagenbestand zu integrieren
- den Betrieb der Anlage durch das Betriebspersonal der Kläranlage ohne Zusatzqualifikation zu ermöglichen und
- die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und somit die Akzeptanz für das Verfahren durch positive Nebeneffekte (Synergieeffekte) im Kläranlagenbetrieb möglichst zu verbessern.

Neuartig ist die Integration einer Verfahrensstufe zur Rücklösung des im Klärschlamm gebundenen Phosphats, um die angestrebte Abreicherung im entwässerten Klärschlamm unterhalb des Schwellenwertes von 20 g P/kg TM zu erreichen.

## 2 Klärwerk Göppingen

Das Klärwerk Göppingen mit einer Ausbaugröße von 330.000 EW reinigt das industrielle und kommunale Abwasser von rd. 110.000 angeschlossenen Einwohnern und damit über 40% des im Landkreis Göppingen anfallenden Abwassers.

Im Jahresmittel 2020 lagen die tägliche Abwassermenge ( $Q_d$ ) bei rd. 39.600 m<sup>3</sup>/d und der Trockenwetterzufluss ( $Q_{TW}$ ) bei rd. 25.100 m<sup>3</sup>/d (Jahresbericht Jedele und Partner (JuP) 2020).

### 2.1 Schmutzfrachtbelastung

Die mittlere Schmutzfrachtbelastung unterscheidet sich nach den verschiedenen Parametern stark (Jahresberichte JuP, Jahresmittel 2018-2020, gerundet):

CSB → 218.000 EW<sub>120</sub>

N<sub>ges</sub> → 208.000 EW<sub>11</sub>

P<sub>ges</sub> → 119.000 EW<sub>1,8</sub>

Vor allem die deutlich höhere Belastung nach dem Parameter CSB weist darauf hin, dass dem Klärwerk kein typisch kommunales Abwasser zufließt. Der CSB-Überhang wird maßgeblich auf den Zufluss industrieller bzw. gewerblicher Abwässer zurückgeführt. Die zufließende Phosphor-Fracht ( $P_{ges}$ ) hingegen spiegelt vornehmlich die Anzahl der angeschlossenen Einwohner (rd. 110.000 E) wider.

### 2.2 Abwasserreinigung / P-Elimination

Die Abwasserreinigung erfolgt mit vorgeschalteter Denitrifikation und chemischer Phosphat (P)-Fällung. Die beim Bau der Anlage vorgesehene Betriebsweise mit vermehrter biologischer Phosphor-Elimination (Bio-P) wird bereits seit vielen Jahren nicht mehr betrieben. In den unbelüfteten Becken DN1 und DN2 kann jedoch ungerichtet eine vermehrte biologische P-Elimination stattfinden.

Zur sicheren Einhaltung der wasserrechtlich geforderten P-Ablaufwerte wird eine Simultanfällung mit FeCl<sub>3</sub> und seit 2012 zusätzlich auch mit AlCl<sub>3</sub> durchgeführt.

Die Fällmitteldosierung erfolgt an zwei Stellen im Kläranlagenbetrieb:

- > Zulauf Belebungsanlage – Mischprodukt „K2“ (Fe/Al) zur Reduzierung des Fadenbakteriums Microthrix (Dosierung konstant)
- > Zulauf Nachklärung (Verteilerbauwerk) – FeCl<sub>3</sub>-Lösung (40%ig) nach Bedarf (Dosierung nach Online-Phosphatmessung im Ablauf NKB)

### 2.3 Schlammbehandlung

Der anfallende Klärschlamm wird in 2 parallel beschickten Faultürmen anaerob stabilisiert. Die Beschickung erfolgt getrennt mit Primärschlamm (PS) und maschinell einge-

dicktem Überschussschlamm ( $\ddot{U}S_{\text{dick}}$ ). Die Schlämme werden vor der Beschickung nicht vermischt.

Die Entwässerung erfolgt mithilfe von 2 Kammerfilterpressen. Der TS-Gehalt des Filterkuchens lag 2020 mit den jahreszeitlich üblichen Schwankungen bei im Mittel 23,3 %. Die Schlammengen ergeben sich nach der Betriebsdatenauswertung im Jahresmittel 2018-2020 wie folgt:

– Primärschlamm	111	m <sup>3</sup> /d	( 4,5 % TS)
– $\ddot{U}S$ eingedickt	77	m <sup>3</sup> /d	( 7,1 % TS)
– Faulschlamm	190	m <sup>3</sup> /d	( 3,4 % TS)
– Filterkuchen (FK)	10.400	t/a	(23,3% TS)

Der entwässerte Klärschlamm wird über Mitverbrennung im Zementwerk entsorgt.

### 3 MAP-Versuchsanlage Göppingen

#### 3.1 Konzeption der MAP-Versuchsanlage

Mit dem Ziel, das im Klärschlamm enthaltene Phosphat in Form von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP, synonym Struvit) zu fällen, wurden 3 neue Verfahrensschritte in das bestehende Schlammbehandlungskonzept der Kläranlage aufgenommen:

1. Schonende thermo-chemische Desintegration des Überschussschlammes ( $\ddot{U}S$ ) nach dem Pondus-Verfahren **vor der Faulung**
2. Milde saure Hydrolyse von Faulschlamm (FS) bei einem pH-Wert von 5-6 (Vorversäuerung) **nach der Faulung**
3. Phosphatfällung im angesäuerten Faulschlamm in Form von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP / Struvit) nach dem AirPrex-Verfahren.

#### 3.2 Thermo-chemische Desintegration von Überschussschlamm / Pondus-Verfahren

##### 3.2.1 Hintergrund

Ziel einer Desintegration von Überschussschlamm vor der Faulung ist es, die Membranen der Mikroorganismen derart zu schädigen, dass die Zellinhaltsstoffe frühzeitig freigesetzt werden. Als Maß für den Aufschluss gilt der CSB-Aufschlussgrad, der beim Pondus-Verfahren laut Auskunft des Verfahrensgebers im günstigen Fall bei etwa 40% liegt (Herr Dünnebeil, Fa. Pondus).

Durch die schnelle Bioverfügbarkeit der Zellinhaltsstoffe wird der Abbau des ansonsten schlecht abbaubaren Überschussschlammes in der Faulung beschleunigt und die organischen Inhaltsstoffe besser umgesetzt. In der Folge kann der Gasertrag steigen. Der Aufschluss wasserbindender Strukturen und Substanzen (z.B. EPS) kann außerdem zu einer Verbesserung der Schlamm entwässerung führen (Kahrs & Hermanussen, 2015).

Diese Effekte sind im Rahmen des Projektes als Synergie-Effekte zu betrachten.

Eigentliches Ziel in Zusammenhang mit der anschließenden P-Rückgewinnung ist die Beobachtung, dass eine vorgeschaltete Klärschlamm desintegration auch zu einer erhöh-

ten Freisetzung von Nährstoffen im Faulschlamm bzw. im Schlammwasser führt (Kopp 2013, Kopp 2014, Merkblatt DWA-M 302).

Im Labor von Frau Dr. J. Kopp wurde deshalb im Jahr 2016 die in Göppingen geplante Versuchsanlage nachgestellt, um diesen Effekt mit Göppinger Faulschlamm zu überprüfen. In den Vorversuchen erhöhte sich der gelöste Phosphor-Gehalt im Faulschlamm durch die vorgeschaltete Desintegration um 11% und der Gehalt an gelöstem Stickstoff um 8% (Kopp, 2016). Dies entspricht dem gewünschten Effekt und soll in der Versuchsanlage dazu beitragen, die Phosphat-Verfügbarkeit für die anschließende MAP-Fällung zu erhöhen.

### 3.2.2 Verfahren

Beim Pondus-Verfahren wird eingedickter Überschussschlamm (4% - 8% TR) mengenproportional mit 1,5 - 2 L/m<sup>3</sup> Natronlauge (50%) versetzt, in einem Wärmetauscher über die Abwärme der BHKW-Anlage auf eine Reaktionstemperatur von 60°C - 70°C erhitzt und in den Schlammzirkulationskreislauf des zweistufigen Aufschlussreaktors gefördert (Abbildung 1).

Der Reaktor verfügt über einen inneren und einen äußeren Bereich. Der Zirkulationsstrom wird aus dem äußeren Bereich abgezogen und nach Durchströmen des Schlammwärmetauschers in den Reaktor zurückgeführt. Durch Überströmen fließt der aufgeschlossene Schlamm in den inneren Bereich des Reaktors, von wo aus er nach einer Verweilzeit von 1,5-2 h füllstandsgesteuert über Schlammabzugspumpen zur Faulung gefördert wird.

Die zwei Faultürme werden wechselweise mit desintegriertem Überschussschlamm und Primärschlamm befüllt. Die Zugabe von Primärschlamm stellt die Abkühlung des erhitzten Überschussschlammes auf ca. 40°C sicher und ist somit für die Einstellung der gewünschten Betriebstemperatur in den Faultürmen erforderlich.

Die niedrige Aufschlusstemperatur im Pondus-Verfahren kommt einer Anwendung auf der Kläranlage besonders entgegen, da die Wärme mithilfe der bestehenden BHKW-Anlage zur Verfügung gestellt werden kann und keine zusätzlichen Anlagen zur Dampferzeugung oder Thermoöl-Erhitzung erforderlich sind.

Der Desintegrationsreaktor kann aufgrund der niedrigeren Betriebstemperatur drucklos betrieben werden und ist daher konstruktionstechnisch einfacher als Reaktionsbehälter im Hochtemperaturbereich.

Außerdem kommt die Wärme der BHKW-Anlage unverändert der Beheizung des Faulturmes zugute, so dass sie doppelt genutzt wird.

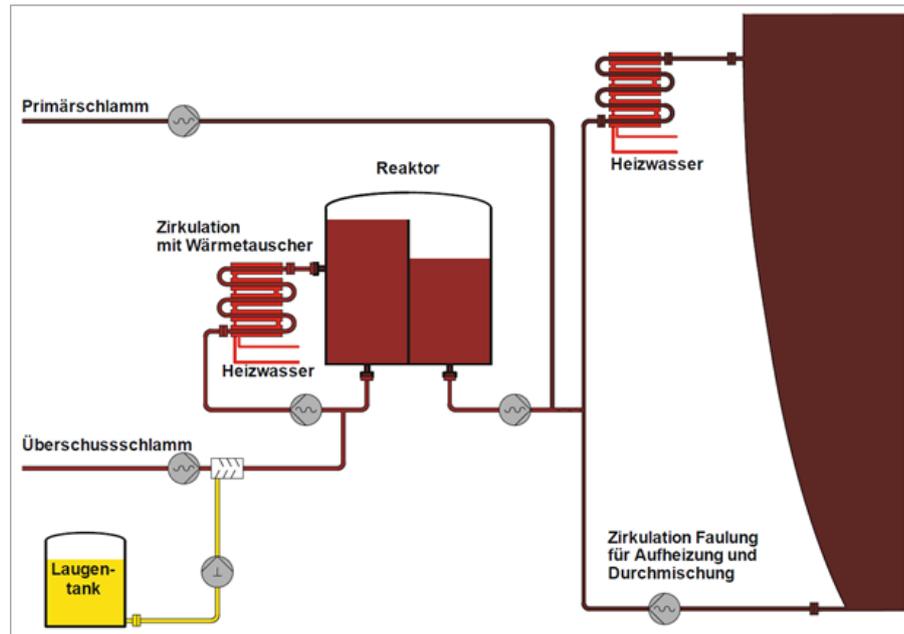


Abbildung 1: Schema Pondus-Verfahren

### 3.2.3 Auslegung

Die Desintegrationsanlage in Göppingen ist wie folgt ausgelegt:

Tabelle 1: Datenblatt Pondus-Anlage Göppingen

<b>Datenblatt Pondus</b>			
Gesamtvolumen	m <sup>3</sup>		9,0
Nutzvolumen	m <sup>3</sup>		max. 8,1
	%		90
Durchmesser	Zylinder	mm	1.500
Höhe	Zylinder	mm	4.825
Gesamthöhe (mit Konus)		mm	5.575
<b>Auslegung</b>			
Auslegungstemperatur		°C	max. 90
Auslegungsdruck			drucklos
Abluftfilter			CleanPellets®
Heizwasser ein/aus		°C	80/65
Heizwasserdurchsatz		m <sup>3</sup> /h	12,5
Input: Überschussschlamm		% TR	max. 8,0
Schlammtemperatur ein/aus		°C	53/65
Ziel pH-Wert		pH	8
Verbrauch NaOH		l/m <sup>3</sup> ÜS	1,5-2,0
Schlammdurchsatz		m <sup>3</sup> /h	3,3
		m <sup>3</sup> /d	max. 5
Reaktionstemperatur		°C	80
		°C	60-70

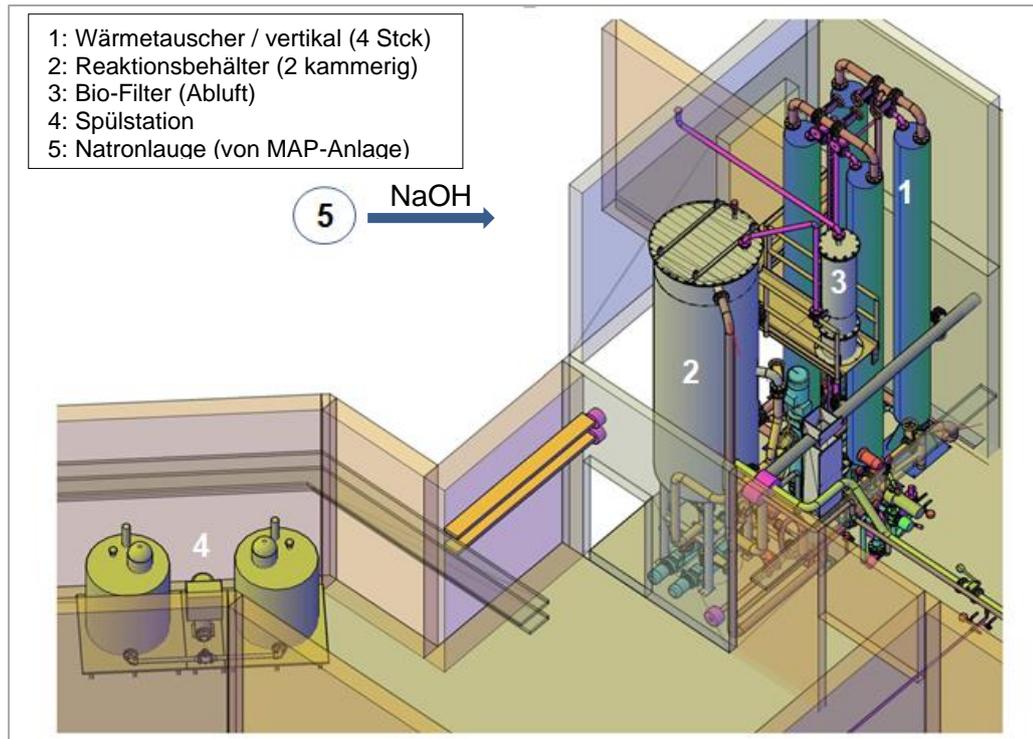


Abbildung 2: Pondus-Anlage (3D-Ansicht)

### 3.3 Milde saure Hydrolyse von Faulschlamm (Vorversäuerung)

#### 3.3.1 Hintergrund

Auf dem Klärwerk Göppingen erfolgt die P-Elimination chemisch mit Eisen- und Aluminiumsalzen. Bei der anaeroben Stabilisierung wird die Biomasse abgebaut und zuvor zellgebundenes Phosphat wird wieder freigesetzt. Bei Anwesenheit von stets vorhandenen Metall-Kationen wird das freigesetzte Phosphat im Faulschlamm erneut gefällt, so dass es zu Umlagerungsprozessen kommt.

Im ausgefaulten Klärschlamm liegt der Phosphor zu

- ca. 65-90% physiko-chemisch gebunden (als Metallphosphate)
- ca. 10-30% biologisch gebunden (in den Bakterienzellen)
- ca. 3 - 5% in gelöster Form vor

(Jardin, 2002).

Bei Schlämmen, in denen das Phosphat durch Bio-P angereichert ist, erfolgt die Umlagerung nicht vollständig, so dass das Schlammwasser reich an gelöstem Phosphat ist und sich die Entwässerung des Schlammes dadurch verschlechtert. Für die MAP-Fällung ist dies von Vorteil, da hierbei nur das im Schlammwasser gelöste Phosphat reagieren kann. Deshalb wird das AirPrex-Verfahren vorzugsweise auf Kläranlagen mit Betrieb von Bio-P eingesetzt.

Auf der Kläranlage in Göppingen wird keine gezielte Bio-P betrieben. Um den Phosphatgehalt des Göppinger Klärschlammes dennoch zu steigern, wird neben der Klär-

schlammintegration (vor der Faulung) eine milde saure Hydrolyse (nach der Faulung) als weiterer Verfahrensschritt zur Phosphat-Rücklösung in das Gesamtkonzept aufgenommen. Diese soll in Anlehnung an das sog. Stuttgarter Verfahren mit Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) bei einem pH-Wert um 6 erfolgen.

Durch die Änderung des pH-Werts im Faulschlamm werden die Metallphosphate aus der P-Elimination ( $FePO_4$ ,  $AlPO_4$ ) nicht bzw. nur wenig zurückgelöst, wohl aber die in unterschiedlicher Form gebundenen Calcium-Phosphate (Abbildung 3).

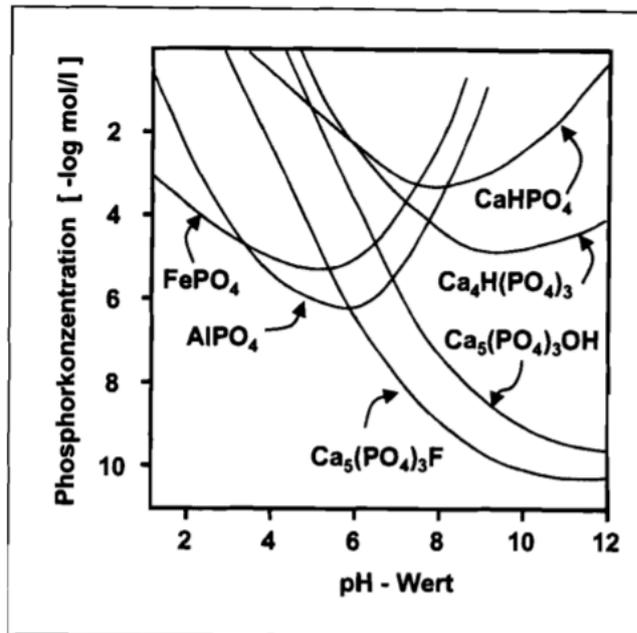


Abbildung 3: Löslichkeit von Metallphosphaten in Abhängigkeit vom pH-Wert (ATV, 1985)

Tabelle 2: Rücklöseversuche mit Göppinger Faulschlamm (ISWA 2020 / 2021)

Datum Versuch	TR [g/kg]	$P_{ges}$		$P_{gelöst}$ gemessen als $PO_4$ -P						
		[mg/L]	[g/kg] TM	pH 7,7 (original))	pH 6,0	pH 5,9	pH 5,8	pH 5,7	pH 5,6	pH 5,5
09.10.20 V1_20	43	1100	25,6	36,7	169	--	--	--	--	474
				3 %	15 %	--	--	--	43 %	
09.12.20 V2_20	32	805	25,2	41,9	146	172	147	207	218	213
				5 %	18 %	21 %	18 %	26 %	27 %	26 %
25.01.21 V3_21	31	733	23,6	46,7	115	--	--	--	--	254
				6 %	16 %	--	--	--	35 %	

Um die Rücklöseraten für Phosphor im Göppinger Faulschlamm zu bestimmen, wurden durch ISWA wiederholt Rücklöseversuche durchgeführt (Tabelle 2, siehe auch Bericht zur wissenschaftlichen Begleitung). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass bei einem pH-Wert von 6 etwa 15% Phosphor in Lösung vorliegen, die Rate jedoch bei pH 5,5 auf ca. 35% gesteigert werden kann. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde der Ziel-pH-Wert auf pH 5,5 neu festgelegt.

### 3.3.2 Verfahren

Die Hydrolyse mit Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ), erfolgt in einem säurefesten, geschlossenen Reaktor mit Rührwerk. Da durch die Säurezugabe aufgrund der Verschiebung des Kohlensäure/Carbonat- Lösungsgleichgewichtes  $CO_2$  ausgetrieben wird, kommt es zur Schaumbildung, die über eine Schaumsonde überwacht wird. Um ein Überlaufen des Reaktors zu vermeiden, wird bei Bedarf Entschäumungsmittel dosiert.

Die Aufenthaltszeit im Hydrolysereaktor ist auf 1 h ausgelegt.

Die pH-Messung erfolgt im Ablauf des Reaktors bzw. in der Zulaufleitung zum MAP-Fällungsreaktor.

Die Abluft aus dem Versäuerungsreaktor (1) und die Abluft aus dem MAP-Reaktor (2) werden zusammengeführt, in einer gemeinsamen Leitung bis zum Dach geführt und dort über einen Bio-Filter an die Außenluft abgegeben (Abbildung 5).

## 3.4 MAP-Fällung / AirPrex-Verfahren

### 3.4.1 Hintergrund

Im Schlammwasser gelöstes Phosphat ( $PO_4^-$ ) reagiert in leicht alkalischem Milieu mit Magnesium ( $Mg^{2+}$ ) und Ammonium ( $NH_4^+$ ) im Mol-Verhältnis 1:1:1 zu Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP oder Struvit).

Im Faulturm stellt sich aufgrund des hohen  $CO_2$ -Gehaltes im Faulgas, der üblicherweise bei 25-35% liegt, und des Lösungsgleichgewichtes von  $CO_2$  ein pH-Wert im Faulschlamm von pH 6,8 -7 ein. Bei Abzug des Faulschlammes entweicht  $CO_2$  in die Atmosphäre und der pH-Wert steigt. Gleichzeitig nimmt die Löslichkeit der Ammonium- und Phosphationen ab. Bei Anwesenheit von Magnesium kommt es zur Ausfällung von MAP (Struvit), das als hartnäckige kristalline Verkrustung erhebliche Probleme in nachgeschalteten Aggregaten und Leitungen verursacht. Aus diesem Grunde wird das AirPrex-Verfahren bevorzugt auf Kläranlagen mit Bio-P zur Vermeidung von Inkrustationen eingesetzt.

Da die MAP-Bildung bereits bei einem pH-Wert von 7 beginnt, sollte der Schlammabzug aus dem Faulturm derart gestaltet werden, dass möglichst wenig  $CO_2$  zusätzlich ausgetrieben wird und der pH-Wert möglichst wenig ansteigt.

In Göppingen liegt der pH-Wert des Faulschlammes direkt nach Abzug aus dem Faulbehälter bei 7,3 – 7,4 und steigt auf dem Weg zur MAP-Anlage weiter auf pH 7,5 an, so dass er bereits im Bereich beginnender MAP-Bildung liegt und MAP-Ablagerungen in der Faulschlammleitung zur MAP-Anlage begünstigt.

Beim AirPrex-Verfahren wird ausgefauter Schlamm in einen belüfteten Schlaufenreaktor geführt und leicht überstöchiometrisch ( $\beta$ -Faktor 1,5-2) mit Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ ) versetzt. Die Dosierung von  $MgCl_2$  liegt, abhängig vom Phosphatgehalt des Schlammes, etwa bei 2-3 L  $MgCl_2/m^3$  Faulschlamm.

Durch Lufteinblasung wird in der herkömmlichen Betriebsweise des AirPrex-Verfahrens  $CO_2$  ausgetrieben, so dass der pH-Wert um bis zu 0,4 - 0,5 Einheiten steigt (cnp, mündliche Mitteilung).

In der Göppinger Versuchsanlage wird  $CO_2$  bereits während der Vorversäuerung ausgetrieben, so dass zur Erreichung des Ziel-pH-Wertes von 8 für die MAP-Kristallisation zusätzlich zur Belüftung Natronlauge dosiert wird. Dies macht eine pH-Wert-Überwachung im MAP-Reaktor erforderlich.

Bei pH-Wert 8 und einer Aufenthaltszeit im MAP-Reaktor von 8-10 Stunden kommt es im alkalischen Milieu zur Bildung von Struvit (MAP) in Form weißer Kristalle. Zur Abtrennung der Kristalle enthält der Behälter spezielle Einbauten, Bleche an der Wandung, an denen sich die Kristalle abscheiden und in den Absetztrichter rutschen. Um ein Anhaften und damit eine Verkrustung an den Einbauten und der Behälterwand zu vermeiden, sind diese mit einer gummiartigen Beschichtung versehen.

Aus dem Absetztrichter wird der MAP-haltige Schlamm abgezogen und in einem unbelüfteten MAP-Wäscher von den organischen Begleitstoffen möglichst weitgehend befreit (Abbildung 4).

Das sandartige, gewaschene Struvit (MAP) wird in einen Container abgeworfen und an der Luft getrocknet.

Das Waschwasser wird über einen Pufferbehälter in den Fällungsreaktor zurückgeführt, um nicht abgeschiedene Mikrokristalle als Impfkörper in den Prozess zurückzuführen.

Der P-entfrachtete Faulschlamm wird über den Nachdicker in die Schlammvorlage der Schlamm-entwässerung abgeführt und in den vorhandenen Kammerfilterpressen unter Zusatz von Polymer entwässert.

Da der MAP-Fällungsreaktor in Göppingen in einer geschlossenen Halle aufgestellt ist, ist er im Gegensatz zu bestehenden Anlagen zur Vermeidung von Geruchsemissionen (Ammoniak) verschlossen. Die Abluft wird zusammen mit der Abluft des Ansäuerungsreaktors über eine Rohrleitung zum Dach des Gebäudes geführt und dort nach Reinigung über einen Biofilter an die Außenluft abgegeben (Abbildung 5).

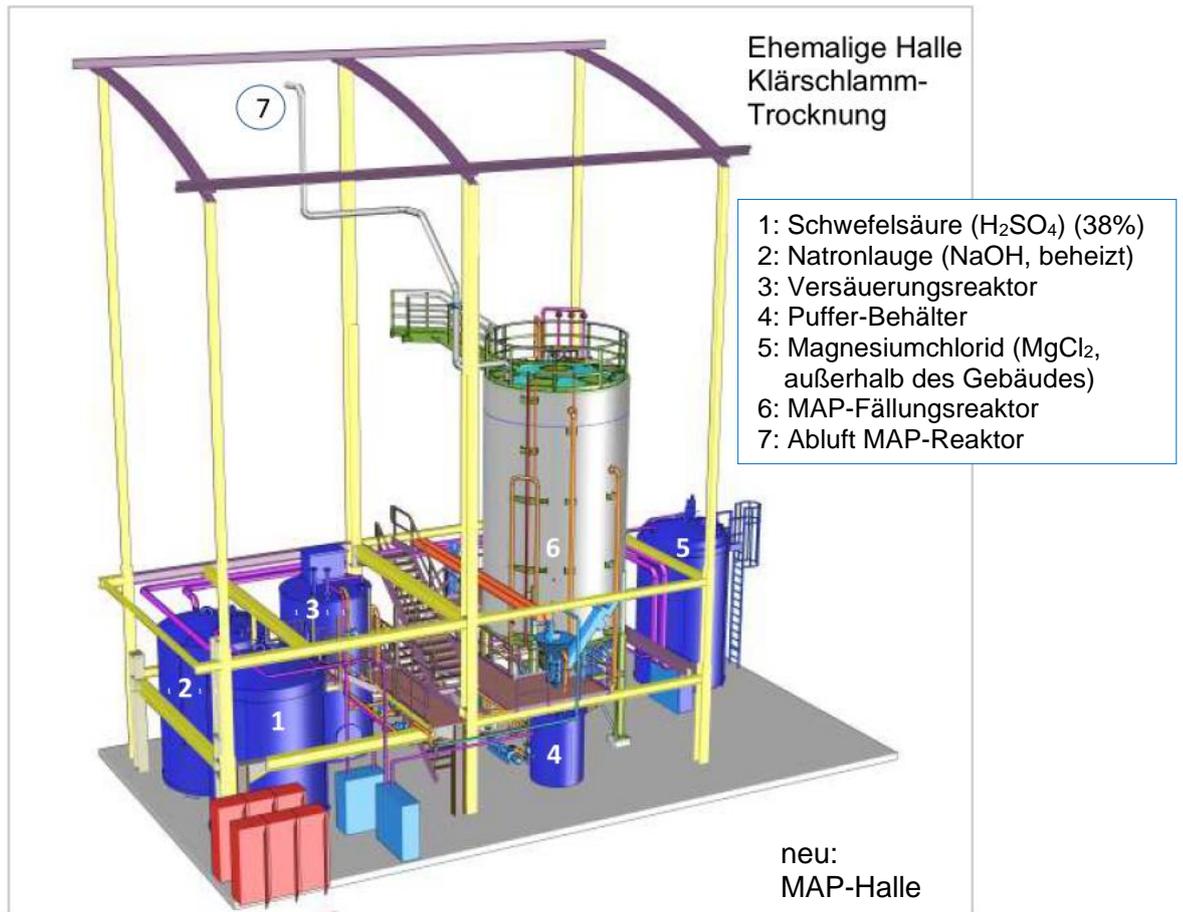


Abbildung 4: MAP-Anlage (3D-Ansicht)

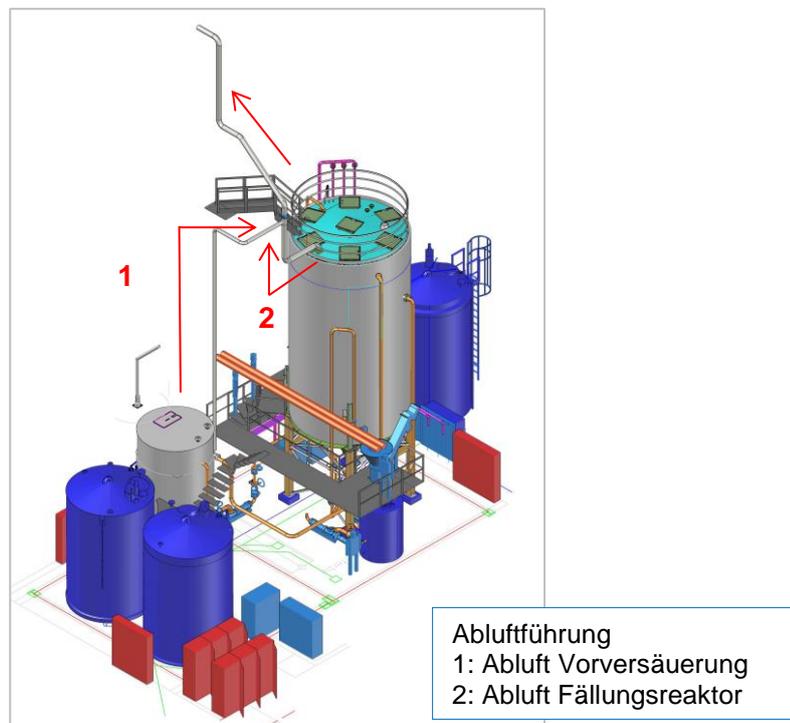


Abbildung 5: Ablufführung der MAP-Anlage (3D-Ansicht)

### 3.4.2 Auslegung

Die MAP-Anlage in Göppingen ist wie folgt ausgelegt:

Tabelle 3: Datenblatt MAP-Anlage

<b>Datenblatt MAP-Anlage</b>					
<b>Versäuerungsreaktor</b>			<b>Lagertank MgCl<sub>2</sub></b>		
Volumen	m <sup>3</sup>	20	Volumen	m <sup>3</sup>	25
Durchmesser	m	2,7	Durchmesser	m	3,0
Höhe	m	4,0	Höhe	m	4,0
<b>Fällungsreaktor</b>			<b>Lagertank NaOH</b>		
Durchsatz (Faulschlamm) Q <sub>d</sub>	m <sup>3</sup> /d	220	Volumen	m <sup>3</sup>	25
Q <sub>max</sub>	m <sup>3</sup> /h	9,2	Durchmesser	m	3,0
Aufenthaltszeit t <sub>A</sub>	h	10	Höhe	m	4,0
TR-Gehalt (Faulschlamm)	%	4			
Gehalt PO <sub>4</sub> -P	mg/l	100	<b>Lagertank H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>		
<i>Ohne Absetztrichter:</i>			Volumen	m <sup>3</sup>	30
Volumen	m <sup>3</sup>	92	Durchmesser	m	3,0
Durchmesser	m	4,0	Höhe	m	4,5
Höhe	m	7,5			
<i>mit Absetztrichter:</i>			<b>Pufferbehälter (2 kammrig)</b>		
Volumen	m <sup>3</sup>	115	Volumen	m <sup>3</sup>	3
Durchmesser	m	4,2			
Höhe	m	11,5			

### 3.5 Gesamtkonzeption

Im folgenden Übersichtsschaubild ist die gesamte Versuchsanlage dargestellt. Dabei sind die Komponenten der einzelnen Verfahrensschritte wie folgt farblich voneinander unterschieden:

- > Desintegration des Überschussschlammes – gelb
- > Vorversäuerung (Hydrolyse) – rot
- > MAP-Fällung – grün

Neu hinzugekommene Anlagenteile, die im Zuge der Verfahrensoptimierung nachgerüstet und im folgenden Bericht erläutert werden, sind hellblau gekennzeichnet.

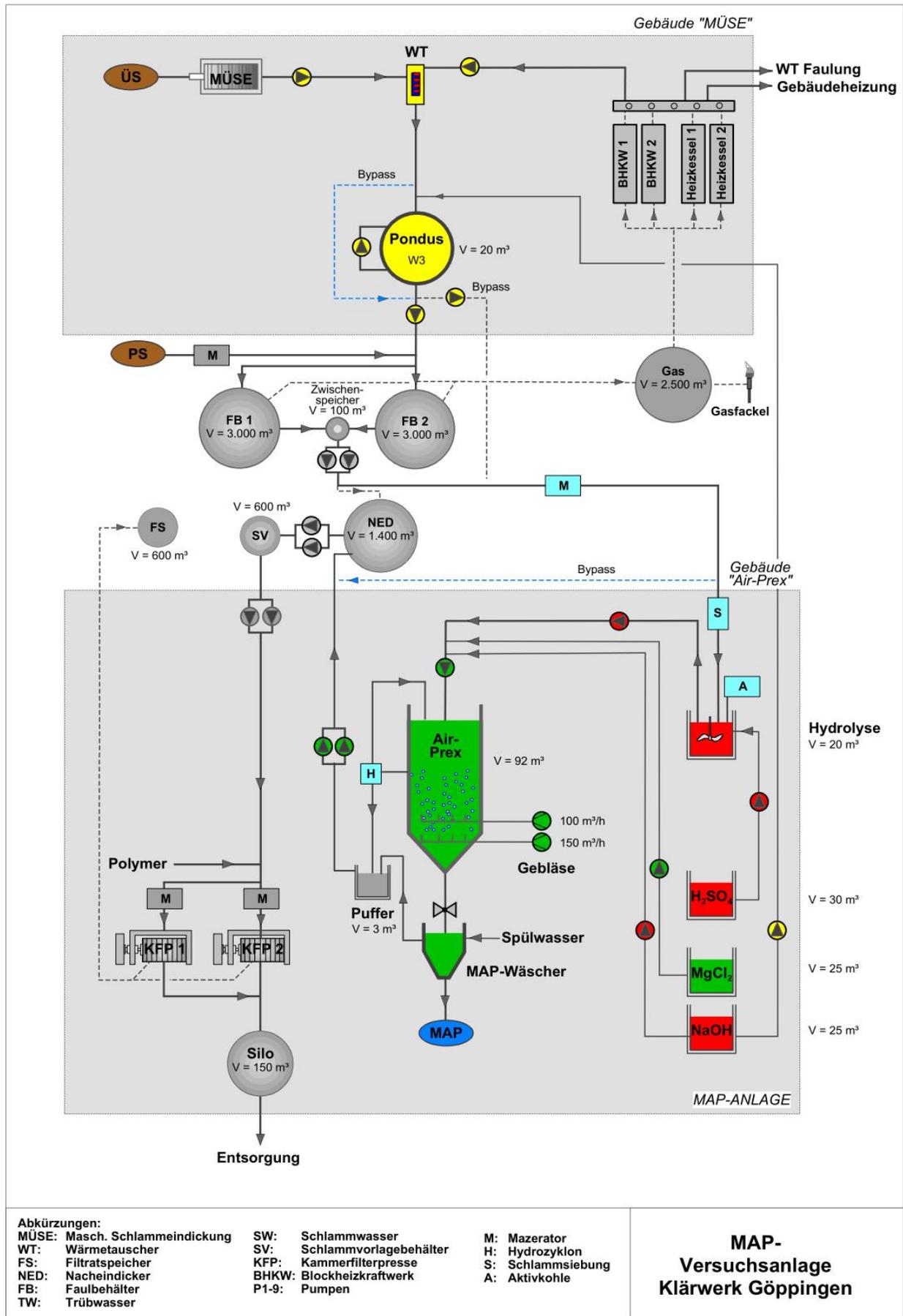


Abbildung 6: Übersichtschaubild MAP-Anlage Göppingen

### 3.6 Einbindung in den Kläranlagenbestand / Standorte

Die Standortsuche für die neuen Anlagen war anspruchsvoll, da die räumliche Situation auf dem Klärwerksgelände sehr eingeschränkt ist und freie Erweiterungsflächen nicht zur Verfügung standen.

Die Grünflächen im Bereich des Klärwerksgeländes sind nahezu vollständig mit unterirdischen Anlagenteilen (Becken, Tanks, Versorgungsanlagen) bebaut, so dass eine Überbauung nicht möglich war. Mehrere Standorte aus der EFRE-Antragstellung mussten nachträglich zugunsten von Sanierungsmaßnahmen im Kläranlagenbestand aufgegeben und neue Standorte gefunden werden. Dies hat dazu geführt, dass eine Unterbringung der neuen Anlagen nur in bestehenden, zwischenzeitlich ungenutzten Räumlichkeiten möglich war und die neuen Anlagen konstruktionstechnisch abgeändert und an die räumlichen Gegebenheiten angepasst werden mussten.

#### 3.6.1 Pondus-Anlage

Für die Errichtung der Desintegrationsanlage nahe der Überschussschlamm (ÜS)-Eindickung musste der ursprünglich geplante Standort neben dem Maschinengebäude wegen der anstehenden Umbauarbeiten der Vorklärung aufgegeben werden. Da die Anlage im Keller des Maschinengebäudes wegen der geringen Raumhöhe keinen Platz fand, stand nur der Raum der stillgelegten Schlammmentgasungsanlage zur Verfügung. Dieser Raum ist durch die extrem kleine Grundfläche und die große Raumhöhe planungstechnisch sehr herausfordernd. Sowohl der erforderliche Wärmetauscher, als auch der Desintegrationsreaktor mussten planerisch an die extremen Platzverhältnisse angepasst werden.

Der Wärmetauscher wurde als Doppelhelix-Wärmetauscher mit vier Elementen in senkrechter Aufstellung ausgeführt (je DxL 0,5 x 6,3 m). Da die Wärmetauscher in dieser Aufstellung für die erforderlichen Reinigungsarbeiten nicht mehr geöffnet werden können, wurde eine zusätzliche Spülstation erforderlich, die außerhalb des Raumes im Versorgungsgang aufgestellt werden musste.

Der erforderliche Natronlaugebehälter musste ebenfalls ausgelagert werden und wurde mit der NaOH-Versorgung der AirPrex-Anlage vereint. Durch die erforderliche Zusammenlegung ergab sich eine ausgedehnte Leitungsführung innerhalb des Klärwerksgeländes und elektrotechnisch ein erhöhter Regel- und Steuerbedarf.

#### 3.6.2 MAP-Reaktor (AirPrex-Reaktor)

Als Standort für den AirPrex-Reaktor zur MAP-Fällung war aufgrund der Größe des Reaktors von Anfang an die Halle der stillgelegten Klärschlamm-trocknung vorgesehen. Durch die Aufstellung in einem geschlossenen Gebäude ergaben sich im Vergleich zu bereits bestehenden Anlagen jedoch erhöhte Anforderungen an eine geschlossene Ausführung mit Abluft-Ableitung und Überwachung nach den Erfordernissen des Arbeits- und Explosionsschutzes.

### 3.6.3 Chemikalienbehälter

Auch der ursprünglich für die erforderlichen Chemikalienbehälter vorgesehene Standort im nicht mehr genutzten Polymergebäude musste zugunsten einer neu zu errichtenden BHKW-Anlage aufgegeben werden.

Der neu gewählte Standort im Trocknungsgebäude, hinter der AirPrex-Anlage, bot nur Platz für 3 Reaktoren (Hydrolyse-Reaktor,  $H_2SO_4$ ,  $NaOH$ ), so dass der  $MgCl_2$ -Behälter im Außenbereich aufgestellt werden musste.

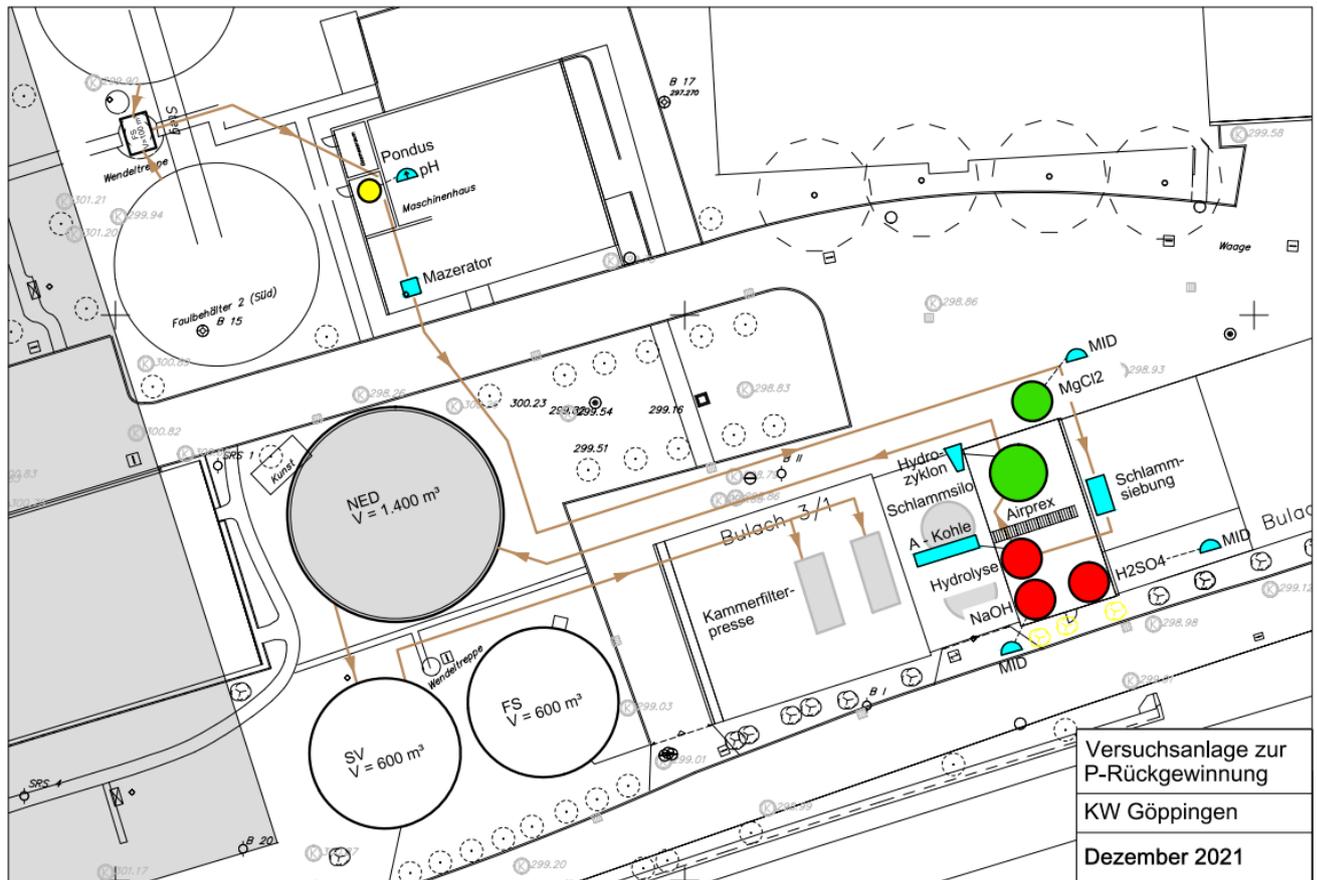


Abbildung 7: Lageplan der MAP-Anlage auf der Kläranlage Göppingen

### 3.7 Abbruch- und Baumaßnahmen 2019

Zu Baubeginn von Februar bis Mai 2019 standen Abbrucharbeiten im Maschinengebäude und der ehemaligen Trocknungshalle an, um die nötigen Freiflächen zu schaffen. Die Stahlkonstruktion im Trocknungsgebäude musste nach statischer Prüfung umgebaut werden.

Die Neuanlagen wurden extern gefertigt und im Mai 2019 (Pondus) bzw. ab Juli 2019 (AirPrex) in die zur Verfügung gestellten Räumlichkeiten eingebracht.

Die Inbetriebnahme der Pondus-Anlage erfolgte ab August 2019, die der AirPrex-Anlage ab Dezember 2019 bzw. Januar 2020.



Abbildung 8: Herrichten der Trocknerhalle für die MAP-Anlage (März 2019)



Abbildung 9: Einbringen der Pondus-Anlage ins Maschinengebäude (Mai 2019)



Abbildung 10: Anlieferung des AirPrex-Reaktors (Juli 2019)



Abbildung 11: Einbringen des AirPrex-Reaktors in die MAP-Halle (Juli 2019)

#### 4 Betrieb der MAP-Anlage

Im Folgenden werden kritische Betriebszustände aus dem Einfahr- bzw. Optimierungsbetrieb beschrieben, die entweder besondere Aufmerksamkeit erfordern, um ein Auftreten derselben von vorne herein zu vermeiden, oder durch entsprechende Nachrüstungen behoben werden konnten.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der Einfahrbetrieb der Versuchsanlage ab Januar 2020 über die technischen Betriebsprobleme hinaus durch die Corona-Pandemie stark beeinträchtigt wurde. Neben den resultierenden personellen Einschränkungen (Personalausfall, Zugangsbeschränkungen für Lieferanten auf dem Klärwerk) führten Liefer-schwierigkeiten bis zuletzt zu großen zeitlichen Verzögerungen bei den erforderlichen Umbaumaßnahmen und Nachrüstungen.

Mehraufwand bereitete auch die Anlagenüberwachung der neu installierten Anlagen, da zur selben Zeit das gesamte Prozessleitsystem der Kläranlage umgerüstet wurde und eine Anbindung der neuen Anlagenteile bis 2021 nicht möglich war.

Die Betriebsüberwachung erfolgte in 2020 über die zusätzlich vor Ort installierten Steuerungen und tägliche Fotodokumentation der Panelbilder durch das Kläranlagenpersonal. Die Werte zur Überwachung der Anlagen wurden von ISWA ausgelesen und in eine Excell-Tabelle übernommen. Die so gewonnenen Momentaufnahmen lieferten nur einen punktuellen Einblick in die Funktionalität der Anlagenteile. Tagesganglinien zur Bewertung der Betriebsverhältnisse standen in dieser Zeit nicht zur Verfügung und waren erst ab 2021 verfügbar.

## 4.1 Betriebsprobleme / Nachrüstungen

### 4.1.1 Desintegration Überschussschlamm / Pondus-Anlage

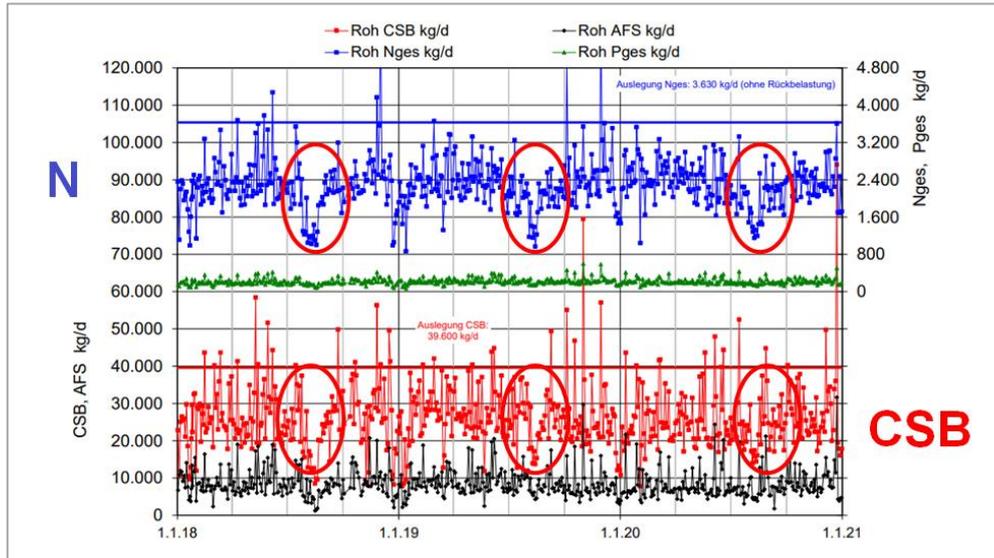
#### ÜS-Schlammangel / „Sommerloch“ 2019

Der Kläranlagenbetrieb auf der KA Göppingen weist durch den Anteil betrieblicher Abwässer neben der typischen Wochenganglinie mit einem Belastungstief am Wochenende ein charakteristisches „Sommerloch“ mit Beginn der Ferien in den Sommermonaten auf (siehe Jahresberichte JuP, Abbildung 12): Die Schmutzfracht im Zulauf der Kläranlage und in der Folge der ÜS-Schlammfall gehen in den Sommermonaten stark zurück, wodurch die Aufenthaltszeit in der Faulung umgekehrt stark zunimmt. Um in dieser Zeit schwacher Belastung die Gasproduktion aufrecht zu erhalten, wird Co-Substrat in die Faulung dosiert. Der geringste Faulgasanfall ist im Herbst zu beobachten.

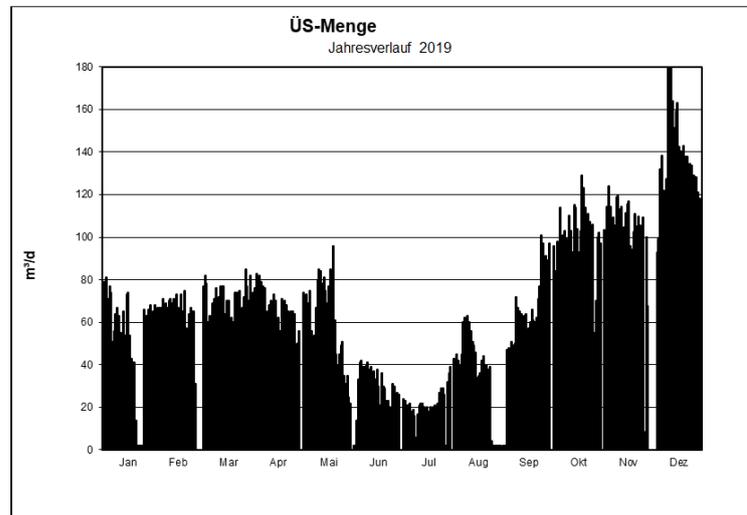
Diese „Sommerloch“ charakteristische Dynamik zeigt sich in den Jahresberichten von JuP bereits seit vielen Jahren mit unterschiedlicher Dynamik. In 2019 trat das „Sommerloch“ deutlich früher und sehr stark auf. In 2020 hingegen ist es deutlich schwächer ausgeprägt, wahrscheinlich aufgrund der Corona-Pandemie und den damit verbundenen Reisebeschränkungen.

Aufgrund des ÜS-Schlammangels im Sommer 2019 konnte die Pondus-Anlage den Vollstrombetrieb erst im Herbst 2019 aufnehmen.

Schmutzfrachten Zulauf KA



ÜS-Schlammmenge



Aufenthaltszeit Faulung

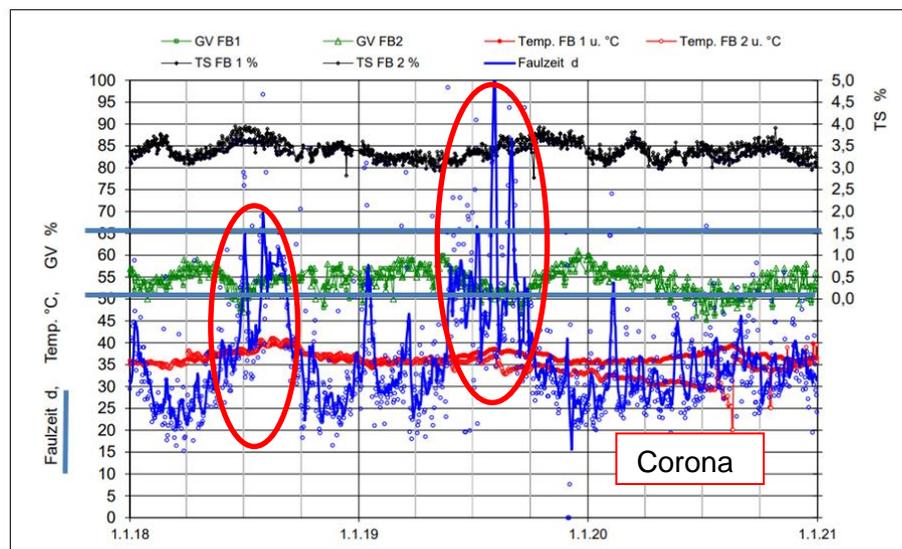


Abbildung 12: „Sommerloch“ auf der KA Göppingen 2019 für die Parameter Schmutzfracht Zulauf Kläranlage, ÜS-Schlammmenge und Aufenthaltszeit Faulung (Jahresbericht 2020 JuP, Betriebsdatenauswertung iat)

### Beschickungsmengen / Belastungsspitzen (Fotodokumentation)

Die Pondus-Anlage ist auf einen Zulauf von 3,3 m<sup>3</sup>/h bei einer maximalen Beschickung von 5 m<sup>3</sup>/h ausgelegt.

Die Beschickung der Pondus-Anlage erfolgt direkt aus dem Abwurfbehälter der ÜS-Eindickung und schwankt sehr stark. Belastungsspitzen mit einem Zulauf über 5 m<sup>3</sup>/h sind betriebsbedingt nicht zu vermeiden. Die Einrichtung eines Vorlagebehälters zur Vergleichmäßigung der Beschickung ist platzbedingt nicht möglich.

Maßnahme: Bau einer Umgehungsleitung zur Vergleichmäßigung der Zulaufsituation mit Abschlag der überschüssigen Menge ÜS (ohne Desintegration) direkt in die Faulung.

### Heizwassertemperatur (Fotodokumentation)

Die Desintegration des Überschussschlammes sollte bei einer Reaktionstemperatur von 60-70°C erfolgen. Um diese Temperatur zu erreichen, wird eine Eingangstemperatur des Heizwassers in den Wärmetauscher von 80 °C benötigt.

Die Betriebsüberwachung des Einfahrbetriebes nach Fotodokumentation zeigt, dass die Anlage stabil in einem Bereich der Reaktionstemperatur von 40-60 °C (Mittelwert 55 °C) läuft. Die angestrebte Reaktionstemperatur von 60-70 °C wird jedoch selbst im Sommer kaum erreicht (Abbildung 13).

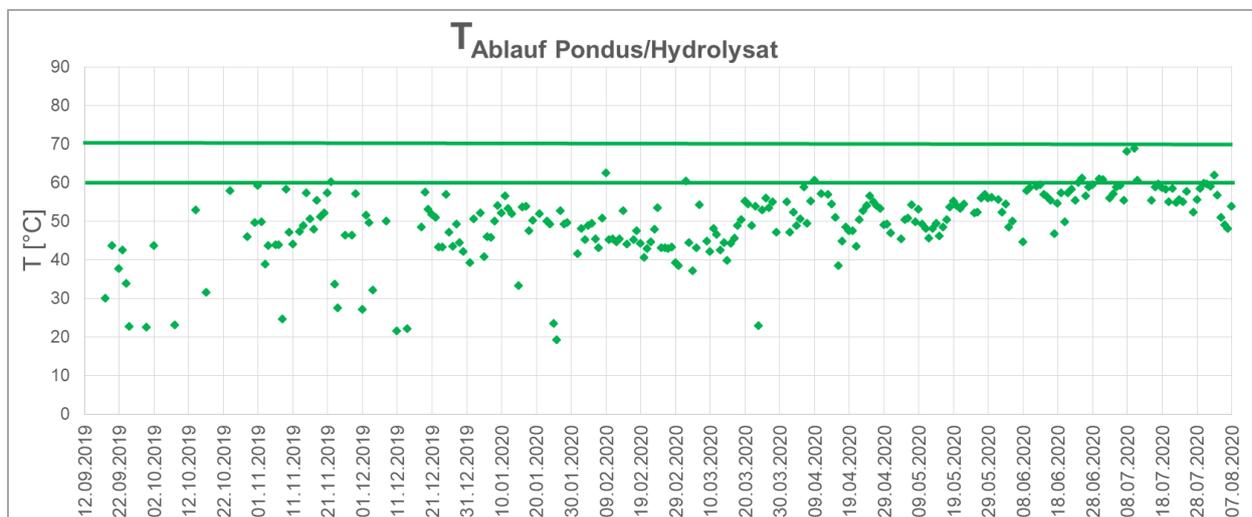


Abbildung 13: Reaktionstemperatur im Pondus-Reaktor (Stichproben, Fotodokumentation)

Neben der Überlastung der Wärmetauscher durch Belastungsspitzen ist von einer verminderten Heizwassertemperatur auszugehen. Die Überprüfung bestätigt, dass die Auslegungstemperatur für die Wärmetauscher von 80 °C im Eingang der Wärmetauscher selbst im Sommer nicht erreicht wird (Abbildung 14).

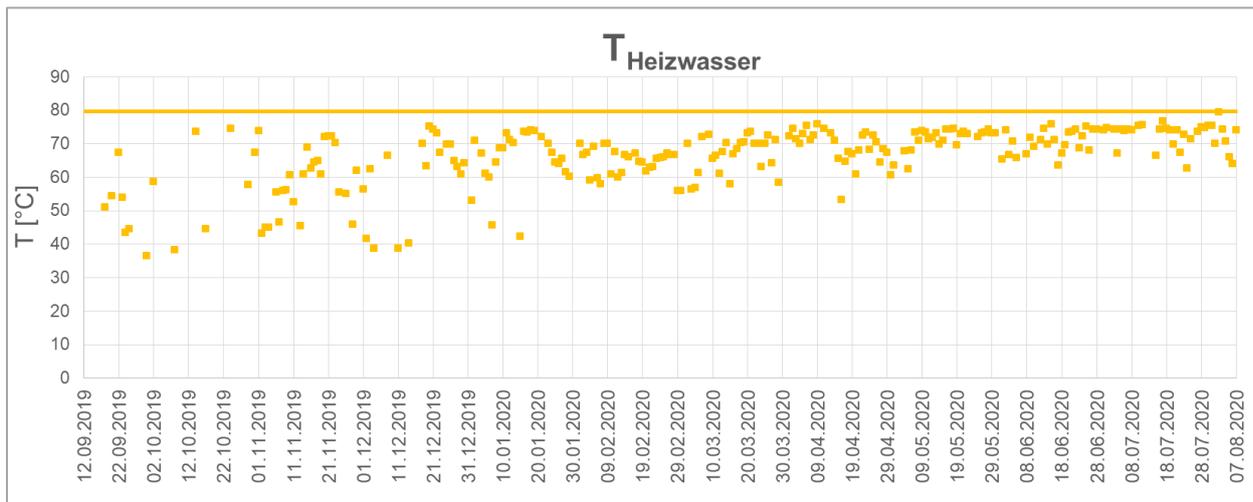


Abbildung 14: Heizwassertemperatur im Zulauf der Wärmetauscher (Stichproben, Fotodokumentation)

Die Überprüfung durch einen Heizungstechniker ergab, dass ein Umbau des Heizwasserabzugs zur Erhöhung der Heizwassertemperatur nicht möglich ist. Aus diesem Grunde muss man davon ausgehen, dass aufgrund einer verminderten Reaktionstemperatur und aufgrund des Abschlags von unbehandeltem ÜS-Schlamm in die Faulung nicht die volle Leistung des Aufschlusses erreicht wird, sondern nur ein reduzierter Teilaufschluss.

### atb-Desintegration

Um die Leistungsfähigkeit der Desintegration in der bestehenden Anlage dennoch zu verbessern, wurden 2021 durch das Ingenieurbüro Jedele und Partner Versuche nach dem atb-Verfahren durchgeführt (siehe Anhang). Bei diesem Verfahren soll der Aufschluss des Überschussschlammes zusätzlich mit Ultraschall unterstützt werden, so dass insgesamt eine alkalische Thermobeschallung (atb) durchgeführt wird (Verfahrensbeschreibung siehe Anhang).

Nach den erfolgversprechenden Vorversuchen hat die SEG die Nachrüstung beschlossen und in Auftrag gegeben. Zum Zeitpunkt der Berichtstellung war die Anlage noch nicht errichtet, so dass keine Ergebnisse aus dem laufenden Betrieb vorliegen.

### 4.1.2 Vorversäuerung (saure Hydrolyse)

#### Schwefelwasserstoff-Bildung (H<sub>2</sub>S)

Bei Inbetriebnahme der Vorversäuerung war bereits kurz nach Start der Säurezugabe ein starker Schwefelgeruch in der MAP-Halle wahrzunehmen, weshalb der erste Versuch zur Inbetriebnahme abgebrochen werden musste. Die daraufhin eingesetzten Gaswarngeräte ließen eine erneute Inbetriebnahme wegen zu hoher Schwefelwasserstoff-Konzentrationen im Bereich der MAP-Anlage nicht zu.

Zur Abklärung des Sachverhaltes wurden Abgasmessungen durch das Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft Arbeitsbereich Emissionen (EMS) durchgeführt (Bericht EMS, 07.08.2020).

Das Messgas wurde in einem Verhältnis von 1/10 verdünnt und vor das Hallentor gefördert. Eine Messung in der näheren Umgebung der Messöffnung war aufgrund der hohen H<sub>2</sub>S-Konzentrationen in diesem Hallenbereich nicht möglich.

Die Versuche zeigten einen schnellen Anstieg der Schwefelwasserstoffkonzentrationen bis in einen arbeitskritischen Bereich, unabhängig vom pH-Wert des Faulschlammes (Abbildung 15).

Mit einem Abluftvolumenstrom von ca. 40 m<sup>3</sup>/h berechnet sich eine Schwefelwasserstoffemission von ca. 240 g/h (Bericht EMS, 07.08.2020). Nach TA-Luft liegt die Emissionsbegrenzung für Schwefelwasserstoff (Klasse II) bei einem Massenstrom von 15 g/h.

Mit dem Geruchssinn wahrnehmbar ist der gasförmige Schwefelwasserstoff, der den typischen Geruch von faulen Eiern verursacht, wahrnehmbar ab ca. 0,02 ppm. Die empfohlene maximale Arbeitsplatzkonzentration liegt nach einer Empfehlung des Umweltbundesamts (UBA) bei 10 ppm [UBA, 2006].

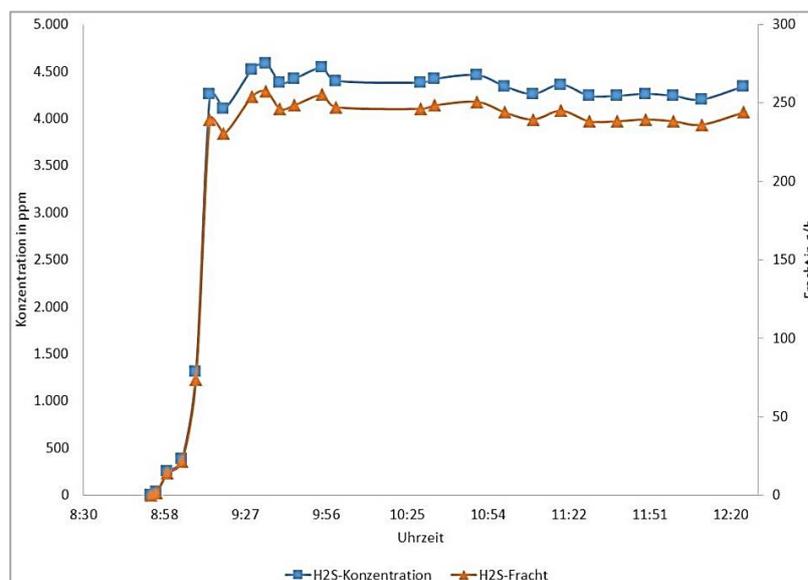


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Schwefelwasserstoff-Konzentrationen im Abgas des Ansäuerungsbehälters im Verlauf der Vorversäuerung (Bericht EMS)

Die Schwefelwasserstoffbildung verhinderte im ersten Betriebsjahr die Durchführung der Vorversäuerung nahezu vollständig, so dass die MAP-Anlage im ersten Betriebsjahr nur mit der herkömmlichen Verfahrensweise (ohne Vorversäuerung) betrieben wurde. Trotz der geringen und schwankenden Phosphatwerte im Faulschlamm (ohne Hydrolyse 70-90 mg/l PO<sub>4</sub>-P) konnte in 2020 Struvit (MAP) abgeschieden werden.

Maßnahme: Planung einer Abluftbehandlung mit Einholung von Vergleichsangeboten (2020), Probetrieb (2020/2021) und Übernahme (2021) der mobilen Abluftanlage, bestehend aus zwei Aktivkohlefiltern à 500 l, inklusiv Kondensatabscheider, Luftheritzer, Ventilator, Zu- und Abluftleitung.

Versuche zur Vorversäuerung des Faulschlammes konnten erst ab Ende 2021 wieder aufgenommen werden.

#### 4.1.3 MAP-Fällung

##### Belastungsspitzen

Die Beschickung der MAP-Anlage mit Faulschlamm erfolgt aus dem Zwischenspeicher der Faulbehälter 1 & 2, der ein Volumen von  $V=100\text{ m}^3$  hat. Die ursprünglich vorgesehene Beschickung aus dem wesentlich größeren Nacheindicker ( $V= 1.400\text{ m}^3$ ) konnte nicht umgesetzt werden, da das Speichervolumen entgegen vorheriger Aussagen für den Betrieb der Kammerfilterpressen unentbehrlich ist.

Der Zwischenspeicher der Faultürme 1 & 2 wird nach dem Verdrängungsprinzip gefüllt, wenn die Faulbehälter frisch beschickt werden. In der aktuellen Betriebspraxis reicht das Volumen des Zwischenspeichers nicht aus für eine gleichmäßige Beschickung der MAP-Anlage, die auf einen Zufluss von  $Q_d= \text{max. } 220\text{ m}^3/\text{d}$  ausgelegt ist (Abbildung 14). Die Fotodokumentation macht deutlich, dass die MAP-Anlage (Betrieb ohne Vorversäuerung) über fast 1 Jahr nur ungleichmäßig und nicht kontinuierlich beschickt wurde und wiederholt außer Betrieb genommen werden musste.

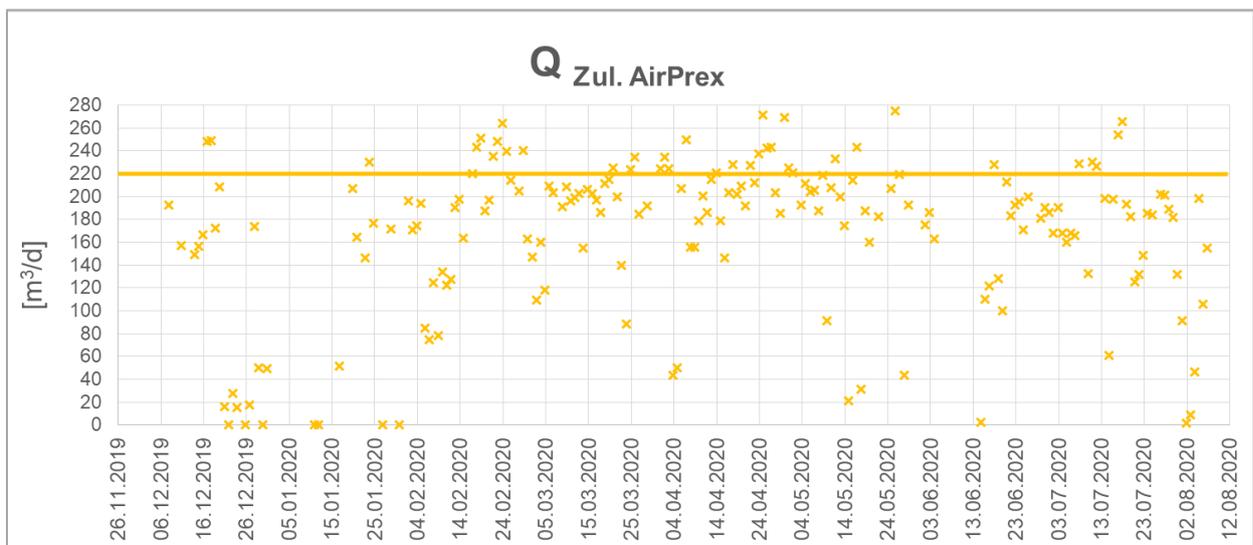


Abbildung 16: Zulauf MAP-Anlage (Stichproben, Fotodokumentation)

Maßnahme: Da wegen der Platzprobleme kein zusätzliches Vorlagevolumen geschaffen werden konnte, wurde auch hier zur Vermeidung von Spitzenbelastungen eine Umge-

hungsleitung in die Schlammvorlage der Kammerfilterpresse bzw. den ebenfalls hierfür genutzten Nacheindicker installiert.

### Verzopfungen

Besonders im ersten Betriebsjahr kam es in der gesamten MAP-Anlage zu Verstopfungen und in der Folge wiederholt zu Überlaufereignissen in der MAP-Halle. Nach Öffnung der betroffenen Aggregate waren starke und lange Verzopfungen als Ursache erkennbar. Im MAP-Reaktor legten sich die Feststopfzöpfe auf die Belüftereinheiten und setzen diese vollständig außer Kraft (Abbildung 17).



Pumpe Vorversäuerung



MAP-Reaktor



MAP-Wäscher

Abbildung 17: Verzopfungen in der MAP-Anlage durch Störstoffe im Faulschlamm

Maßnahme: Installation eines Mazerators in der Faulschlammleitung / Zulauf MAP-Anlage.

### pH-Messung

Durch die Verwendung von Natronlauge zur Anhebung des pH-Wertes auf 8 muss der pH-Wert im MAP-Reaktor kontinuierlich überwacht werden.

Die pH-Messung im MAP-haltigen Faulschlamm ist nicht unproblematisch und erfordert große Aufmerksamkeit, da die pH-Elektrode nur eine Standzeit von wenigen Wochen hat. Dies macht den Betrieb von zwei Elektroden im dauerhaften Wechsel erforderlich, wobei die im Einsatz befindliche Elektrode regelmäßig überprüft und kalibriert werden muss, während die zweite Elektrode regeneriert wird. Um einen unterbrechungsfreien Betrieb sicher zu stellen, ist darüber hinaus stets eine dritte, neue pH-Elektrode vorzuhalten.

### MgCl<sub>2</sub>- Dosierung

Bei der Dosierung von MgCl<sub>2</sub> traten während der Einfahrphase im Winter Verstopfungen durch Kristallbildung im außerhalb des Gebäudes aufgestellten Lagerbehälter auf.

Die Recherche ergab, dass dieses Problem konzentrationsabhängig gelöst werden kann: Die zunächst verwendete handelsübliche  $MgCl_2$ -Lösung (33%) ist nicht geeignet für tiefe Wintertemperaturen, wohingegen eine  $MgCl_2$ -Lösung mit einer geringeren Konzentration von 28% auch als Winterware tauglich ist. Im Folgenden wurde die Anlage dauerhaft mit 28 %iger  $MgCl_2$ -Lösung betrieben. Die geeignete Konzentration sollte vor allem im Winter durch eine Dichtepfung im Labor überprüft werden, um eine Kristallbildung, die nur mit großem Aufwand zu beheben ist, sicher zu vermeiden.

### **NaOH- Dosierung**

Durch Zusammenlegung der Natronlauge (NaOH)-Versorgung von Pondus- und MAP-Anlage ist ein erhöhter steuertechnischer und betriebstechnischer Aufwand zur bedarfsgerechten Verteilung auf die räumlich getrennten Anlagenteile entstanden. Auch bei der Natronlagedosierung kam es wiederholt zu Störungen bei Pumpen und Leitungen durch Kristallbildung, die einen erhöhten Betreuungsaufwand verursacht haben.

### **MAP-Ablagerungen**

Am Jahresende 2020 kam die MAP-Abscheidung in der Versuchsanlage überraschend zum Erliegen.

Gleichzeitig traten MAP-Ablagerungen in der Faulschlammleitung zum MAP-Reaktor auf, so dass diese gereinigt werden muss. In den Ablagerungen waren mit bloßem Auge weiße MAP-Kristalle zu erkennen (Abbildung 18).



Abbildung 18: Ablagerungen in der Faulschlammleitung zum MAP-Reaktor mit weißen MAP-Kristallen



Trotz des installierten Mazerators traten erneut Verzapfungen im MAP-Reaktor mit Belag der Belüfterkerzen auf.

## Schlamm-siebung

Um die sichere Funktionstüchtigkeit des MAP-Reaktors wiederherzustellen, wurde Ende 2021 die Installation einer Schlamm-siebung beschlossen.

*Maßnahme: Aufstellen und Betrieb einer Mietanlage zur Schlamm-siebung, Marke Strainpress® im Zulauf der MAP-Anlage (April 2022).*

Die Strainpress® ist ein horizontal liegender, röhrenförmiger Fremdstoffabscheider der unter Druck Fremdstoffe absiebt, entwässert und austrägt, ohne dass eine Rückspülung erforderlich ist. Das Aggregat arbeitet vollautomatisch und wurde unmittelbar vor der MAP-Anlage (Nebengebäude) in die Zulaufleitung zur MAP-Anlage eingebunden. Bei Betrieb der Schlamm-siebung wird der Mazerator für Faulschlamm in der Zulaufleitung zur MAP-Anlage außer Betrieb genommen, zumal er einen erhöhten Verschleiß zeigt. Dieser Verschleiß wird auf die zwischenzeitlich im Faulschlamm enthaltenen MAP-Kristalle zurückgeführt.



Abbildung 19: Aufstellen des Aggregats zur Schlamm-siebung (April 2022)

## MAP-Abscheidung

Im MAP-Reaktor reagiert Phosphat mit Stickstoff und Magnesium zu MAP. Die Reaktion ist pH-Wert abhängig und beginnt bereits ab pH 7. Das Optimum der MAP-Bildung liegt bei pH 8.

Unter günstigen Reaktionsbedingungen entsteht durch Fällung MAP. Das gefällte MAP lagert sich zu Mikrokristallen zusammen (Kristallisation), die im weiteren Verlauf durch Agglomeration und Aufwuchs zu größeren Kristallen mit einer typischen Sargdeckelform heranwachsen (Kristallreife).

Im Faulschlamm der KA Göppingen liegt der pH-Wert nach Abzug aus dem Faulbehälter bereits bei pH 7,4 bis maximal pH 7,7 und somit in einem pH-Bereich beginnender MAP-

Fällung, so dass es bei Anwesenheit von Magnesium bereits zur Ausfällung von MAP in der Faulschlammleitung kommen kann.

Zum Jahresende 2020 kam die MAP-Abscheidung in der Versuchsanlage aus unerklärlichen Gründen zum Erliegen. Da die MAP-Fällung, erkennbar am niedrigen Phosphatgehalt im Filtrat der Entwässerung, unverändert stattfand, wurde eine mangelhafte Kristallreife zu größeren Kristallen als Ursache für die ausbleibende Abscheidung angenommen.

Mit dem Ziel, das Kristallwachstum zu fördern, wird in der Versuchsanlage routinemäßig das Waschwasser aus dem MAP-Wäscher mit den darin enthaltenen Mikrokristallen über einen Pufferbehälter in den MAP-Reaktor zurückgeführt (Rezirkulation). Die Mikrokristalle stehen dort als Impfkern bzw. Aufwuchskristalle sofort zur Verfügung, um den Aufwuchs zu Makrokristallen zu beschleunigen.

### **Versuche mit einem Hydrozyklon**

Um den Verlust von Mikrokristallen zu vermeiden und die zum Erliegen gekommene Abscheidung von MAP-Kristallen wieder in Gang zu bringen, wurden im Mai 2021 von der Fa. cnp zunächst eigene Labor-Versuche mit einem Hydrozyklon durchgeführt und diese dann später an der Versuchsanlage Göppingen fortgesetzt.

Mit Hydrozyklonen (Fliehkraftabscheider) können in Suspensionen enthaltene Feststoffpartikel wie MAP-Kristalle abgetrennt bzw. klassiert werden. Die Auftrennung von unterschiedlich großen Teilchen beruht auf einem Zusammenspiel von Flieh- und Strömungskräften in dem zylindrisch geformten, sich nach unten verjüngenden Hydrozyklon. Dabei wirkt die Fliehkraft auf die schwereren MAP-Kristalle stärker, so dass diese an die Behälterwand gedrückt werden und mit der dort herrschenden Strömung abwärts transportiert werden. Auf diese Weise werden sie mit dem sog. Unterlauf abgeschieden.

Auf die leichteren, organischen Schlammteilchen wirkt die Fliehkraft nicht so stark, so dass diese im Inneren des Hydrozyklons verbleiben und mit der dort herrschenden Aufwärtsströmung im sog. Oberlauf abgeschieden werden.

Die im Unterlauf angereicherten Kristalle werden als Impfkristalle in den MAP-Reaktor zurückgeführt, während der Organik-führende Oberlauf zur Entwässerung abgeführt wird.

In den Vorversuchen wurden 3D-mikroskopische Untersuchungen vom Überlauf und vom Unterlauf ausgewertet (Mail von cnp, Herr Gerlach, vom 26.05.2021). Es zeigte sich, dass die Schlammprobe aus dem Ablauf MAP-Reaktor erwartungsgemäß viele MAP-Mikro- und Makrokristalle enthielt. Im Trennversuch konnte der Hydrozyklon derart trennscharf eingestellt werden, dass im Überlauf keine MAP-Kristalle mehr auffindbar waren, während der Unterlauf überwiegend MAP-Kristalle der Größenordnung 50-500 µm enthielt.

Als vorteilhaft ist außerdem der Volumensplit zu bewerten: Der Volumenstrom im Oberlauf (mit Organik) betrug 98,3% und im Unterlauf (mit MAP-Kristallen) nur 1,7%. Entsprechend ist die Rückführung der MAP-Kristalle über den Unterlauf zurück in den Reaktor mit sehr geringem Volumenstrom bei hoher MAP-Kristallanreicherung möglich.

*Maßnahme: Probetrieb und abschließende Übernahme eines gemieteten Hydrozyklons und Installation auf der Abdeckung des MAP-Reaktors.*



Abbildung 20: Hydrozyklon auf dem MAP-Reaktor (Juli 2022)

Im Probetrieb zeigte sich, dass die im MAP-Reaktor eingehängte Tauchmotorpumpe nicht die gewünschte Leistung zur Beschickung des Hydrozyklons erbrachte. Daher wurde zur Beschickung des Hydrozyklons die leistungsstärkere Exzentrerschneckenpumpe der Rezirkulation umfunktioniert.

#### 4.1.4 Anlagenbetreuung

Bei der Planung der Versuchsanlage wurde der Betreuungsaufwand für die Versuchsanlage, der sich durch die Fotodokumentation aufgrund der Umrüstung des PLS und die nachgerüsteten Anlagenkomponenten noch deutlich erhöhte, nicht ausreichend berücksichtigt. Neben der ohnehin angespannten Personalsituation auf der Kläranlage, sorgten der Umbau der Vorklärung, die Umstellung des Prozessleitsystems und schließlich die anhaltende Corona-Pandemie für nicht kalkulierbare Betreuungseingpässe. Die aufgetretenen Störungen aufgrund von Verstopfungen oder Steuerungsproblemen, die erforderliche Fotodokumentation durch Ausfall des Prozessleitsystems und die Installation weiterer Aggregate verursachten einen erhöhten Betreuungsaufwand, der ohne zusätzliches Betriebspersonal kaum zufriedenstellend geleistet werden konnte.

Bei zukünftigen Projekten dieser Art sollte für die Anlagenbetreuung mindestens eine zusätzliche Arbeitskraft eingeplant werden.

## 5 Betriebswerte nach Flow Chief (2021, 2022)

Ab Oktober 2020 konnte der Einfahrbetrieb der Versuchsanlage kontinuierlich über Aufzeichnungen aus dem Prozessleitsystem (FlowChief) überwacht werden.

Der folgenden Dokumentation des Einfahrbetriebes liegen die Betriebsdaten des Jahres 2021 bzw. 2022 zugrunde.

### 5.1 Desintegration / Pondus

In den Abbildungen 21 und 22 sind für die Pondus-Anlage die Jahresganglinien aus den Betriebsjahren 2021 und 2022 für folgende Parameter dargestellt:

- Durchfluss (Q) [m<sup>3</sup>/h]
- Reaktionstemperatur (T) [°C]
- pH-Wert Reaktor

#### Betriebsjahr 2021

Die tägliche Beschickungsmenge lag 2021 im Frühjahr und Herbst bei 3,0 – 3,6 m<sup>3</sup>/h und somit im Auslegungsbereich (Sollwert: 3,3 m<sup>3</sup>/h).

In den Sommermonaten von Juli bis September nahm die Beschickungsmenge kontinuierlich ab („Sommerloch“). Der minimale Durchfluss lag bei 1,5 m<sup>3</sup>/h. In dieser Zeit wurde die Natronlaugedosierung aus wirtschaftlichen Überlegungen ausgesetzt, so dass der pH-Wert leicht abfiel (Abbildung 21).

Die angestrebte Reaktionstemperatur von 60-70 °C konnte nur im Sommer erreicht werden. In Frühjahr und Herbst lag sie meist darunter bei 45-55 °C. Im Winter reichte die Wärme des desintegrierten Überschussschlammes nicht für die angemessene Beheizung des Faulschlammes aus, so dass zusätzlich die Faulschlammheizung in Betrieb war.

Bei stabilem Betrieb lag die Natronlaugedosierung bei 7 l/h. Daraus leitet sich bei einem Durchsatz von 3,3 m<sup>3</sup>/h ÜS ein Verbrauch von 2,1 l/m<sup>3</sup>ÜS Natronlauge ab. Dies entspricht den Vorgaben der Auslegung.

Die Jahresganglinie für den pH-Wert im Ablauf der Pondus-Anlage macht deutlich, dass dieser im Frühjahr gut bei pH 7 gehalten werden konnte. Im Sommer und Herbst gibt es jedoch deutliche Unterschreitungen.

#### Betriebsjahr 2022

Im folgenden Betriebsjahr 2022 wurde die Pondus-Anlage von Mitte Juni bis Mitte Juli mangels Überschussschlamm vorübergehend ganz außer Betrieb genommen. Anfang

August ging die Anlage mit zunehmender Schlammproduktion zunächst wieder in Betrieb. Im weiteren Verlauf fällt der Durchsatz jedoch bis Ende Oktober kontinuierlich auf Null ab. An der Aufklärung wird zum Zeitpunkt der Berichtstellung noch gearbeitet.



Abbildung 21: Jahrgang 2021 für Q, T, NaOH (Pondus-Anlage, Flow Chief)

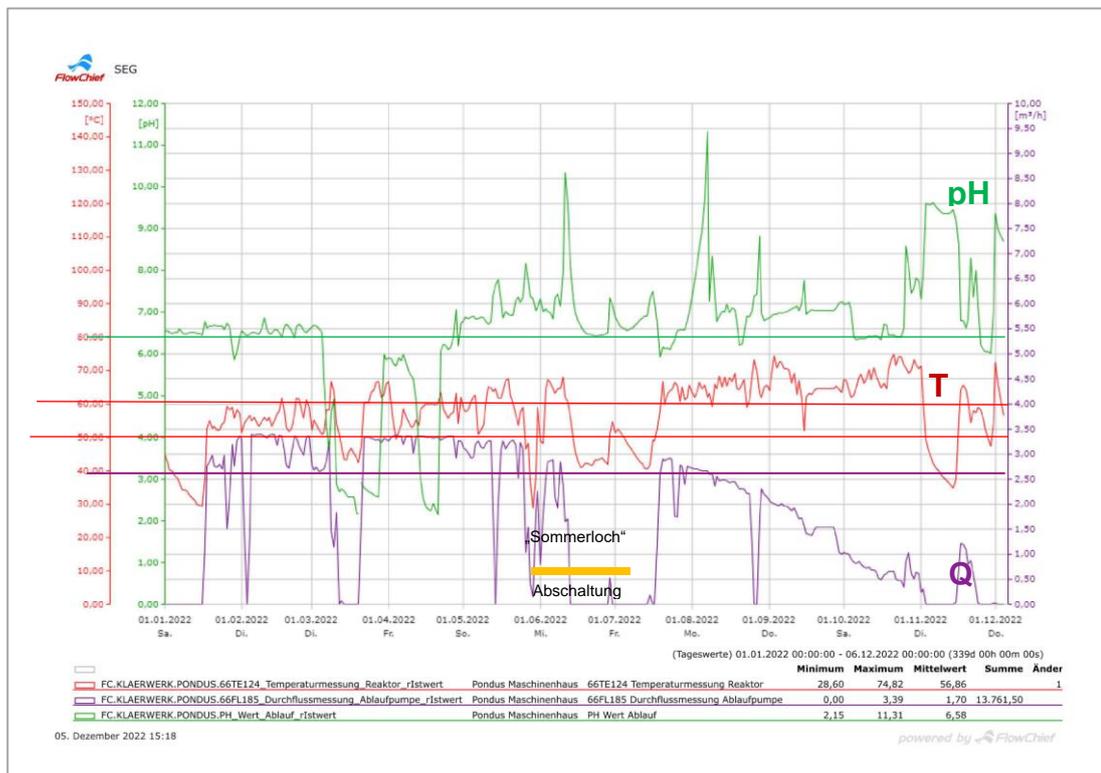


Abbildung 22: Jahrgang 2022 für Q, T, NaOH (Pondus-Anlage, Flow Chief)

## 5.2 Vorversäuerung (saure Hydrolyse)

Zu Jahresbeginn 2021 wurde mit Erreichen der ausgelegten Durchsatzmenge im MAP-Reaktor (9 m<sup>3</sup>/h) mit der Inbetriebnahme der Vorversäuerung begonnen (03./04.03.2021) (Abbildung 23). Diese musste bei Auftreten kritischer Schwefelwasserstoffkonzentrationen in der Umgebungsluft der Anlage jedoch sofort abgebrochen werden.

Nach Umbau der Dosierlanze zur Vermeidung dieser Gasbildung wurde ein zweiter Dosiersversuch gestartet. Dieser konnte wegen der anhaltenden Schwefelwasserstoffbildung jedoch nur für 9 Tage aufrechterhalten werden (14.03.-23.03.2021).

Die unerwartete Schwefelwasserstoff-Problematik machte die Durchführung der Vorversäuerung bis auf weiteres unmöglich und die Planung und Nachrüstung einer Abgasreinigung erforderlich.

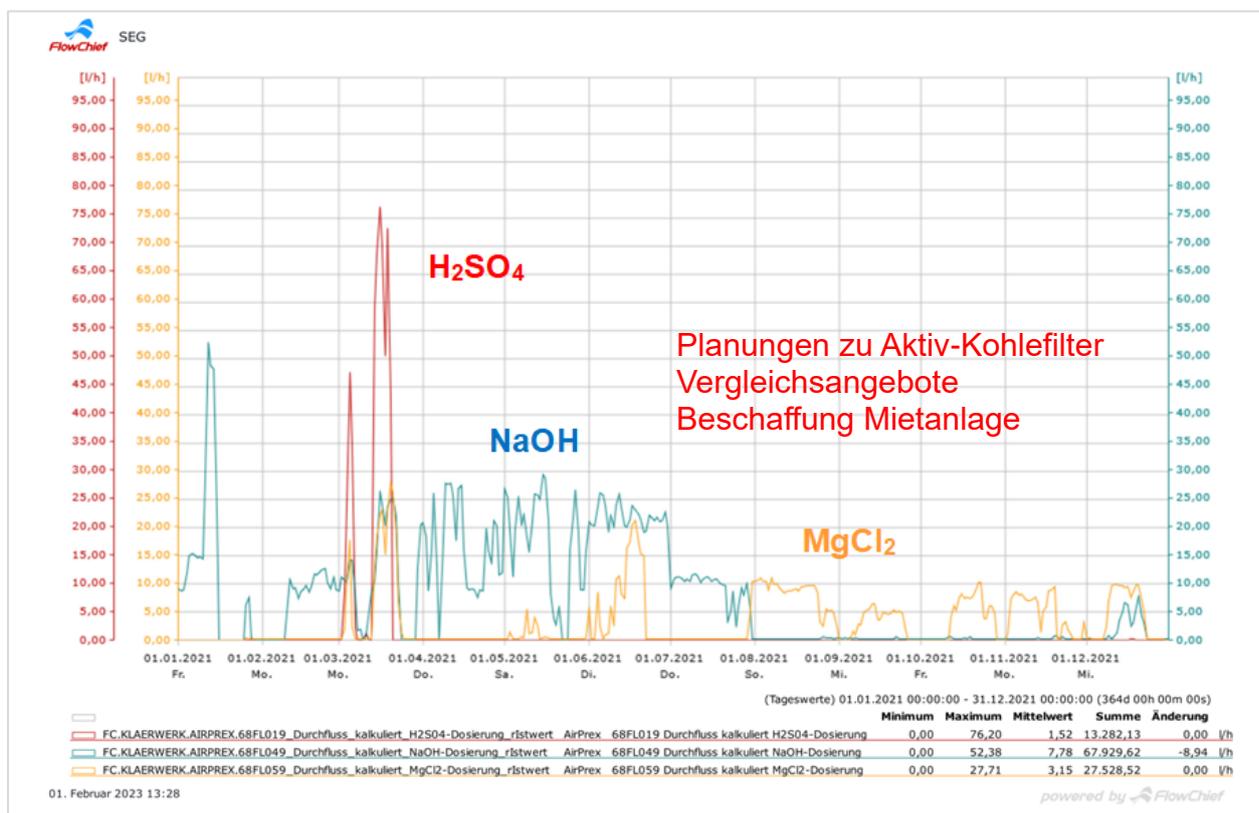


Abbildung 23: Dosierung von H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH und MgCl<sub>2</sub> (AirPrex-Anlage, Flow Chief 2021)

## 5.3 MAP-Fällung (AirPrex)

Die MAP-Fällung wurde Ende 2019 bzw. Anfang 2020 ohne Vorversäuerung in Betrieb genommen (Abbildung 24).

Der Phosphatgehalt im Faulwasser (Faulschlamm) zeigte die bereits beschriebenen, starken Schwankungen. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der MAP-Anlage lag er bei 130-140 mg/l.

Bei laufendem Betrieb der MAP-Anlage muss man den Phosphatgehalt im Faulwasser (mit gelöstem Phosphat) und im Filtrat der Kammerfilterpresse (Phosphat wasserunlöslich gebunden in MAP) getrennt betrachten. Die Kurvenverläufe beider Parameter in Abbildung 24 zeigen deutlich, wann die MAP-Anlage und somit die Fällung in Betrieb sind und den Phosphatgehalt im Filtrat senken. Bei jeder Ausserbetriebnahme der Anlage resultiert umgekehrt ein sofortiger Anstieg des Phosphatgehaltes.

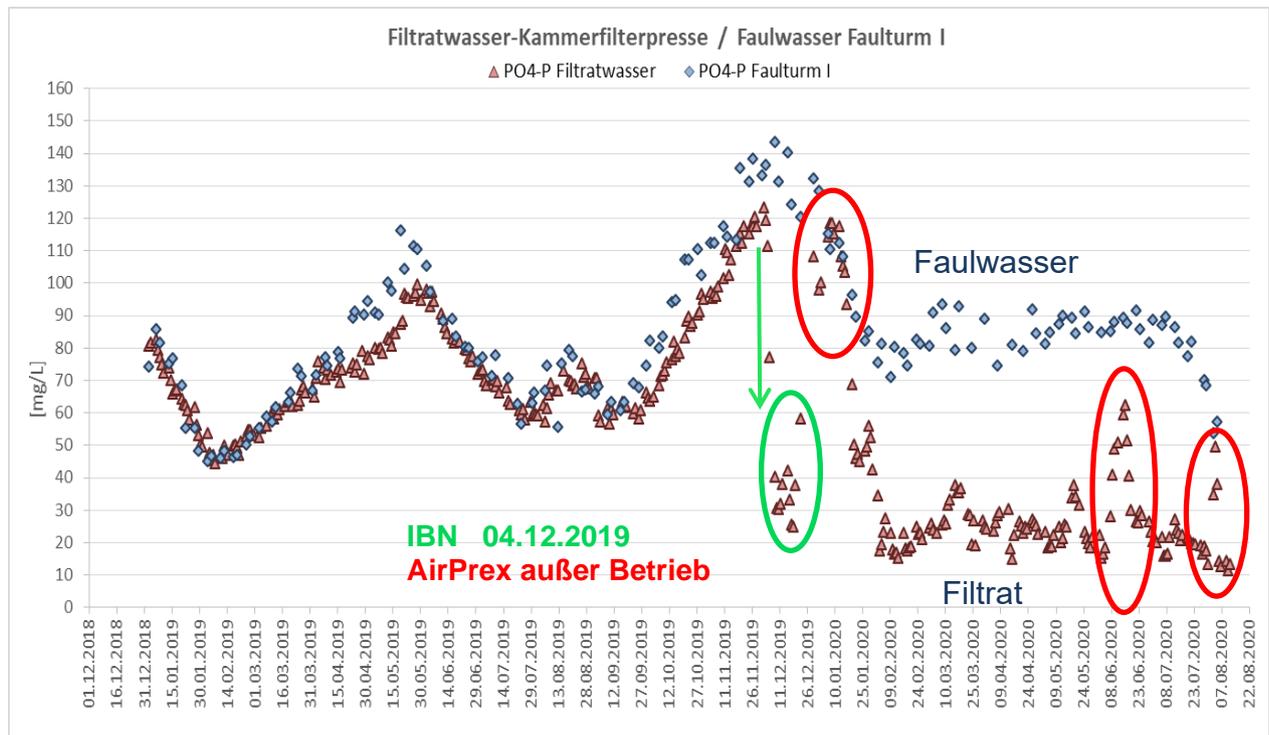


Abbildung 24: Gehalt an gelöstem Phosphat in Faulwasser und Filtrat KFP bei Betrieb der MAP-Anlage (Laborwerte SEG, 2019)

Aus den Flow Chief-Kurven des Betriebsjahres 2021 geht hervor, dass ein Dauerbetrieb der MAP-Anlage nicht erreicht wurde, da der Betrieb der Anlage durch zunehmende Verstopfungen beeinträchtigt war. Infolgedessen musste die Anlage zum Jahresende immer häufiger außer Betrieb genommen und zeitaufwändig gereinigt werden (Abbildung 25, rote Balken).

Im darauffolgenden Betriebsjahr 2022 (Abbildung 25) wurde der Betrieb der MAP-Anlage durch die Installation des Hydrozyklons unterbrochen und teilte sich somit in 2 Betriebszeiträume auf. Wegen Abholung der gemieteten Schlammsiebung musste der Betrieb ab Mitte Oktober ausgesetzt werden.

Die Vorversäuerung konnte für eine intensive Messkampagne im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung über einen längeren Zeitraum vom 15.09.- 22.10.2022 störungsfrei betrieben werden. Allerdings zeigte die Ganglinie des Durchflusses während dieser Zeit einen unerklärlichen Abfall, der sich bei der Überprüfung als fehlerhafte Signalübertragung ans PLS-System über 10 Tage herausstellte.

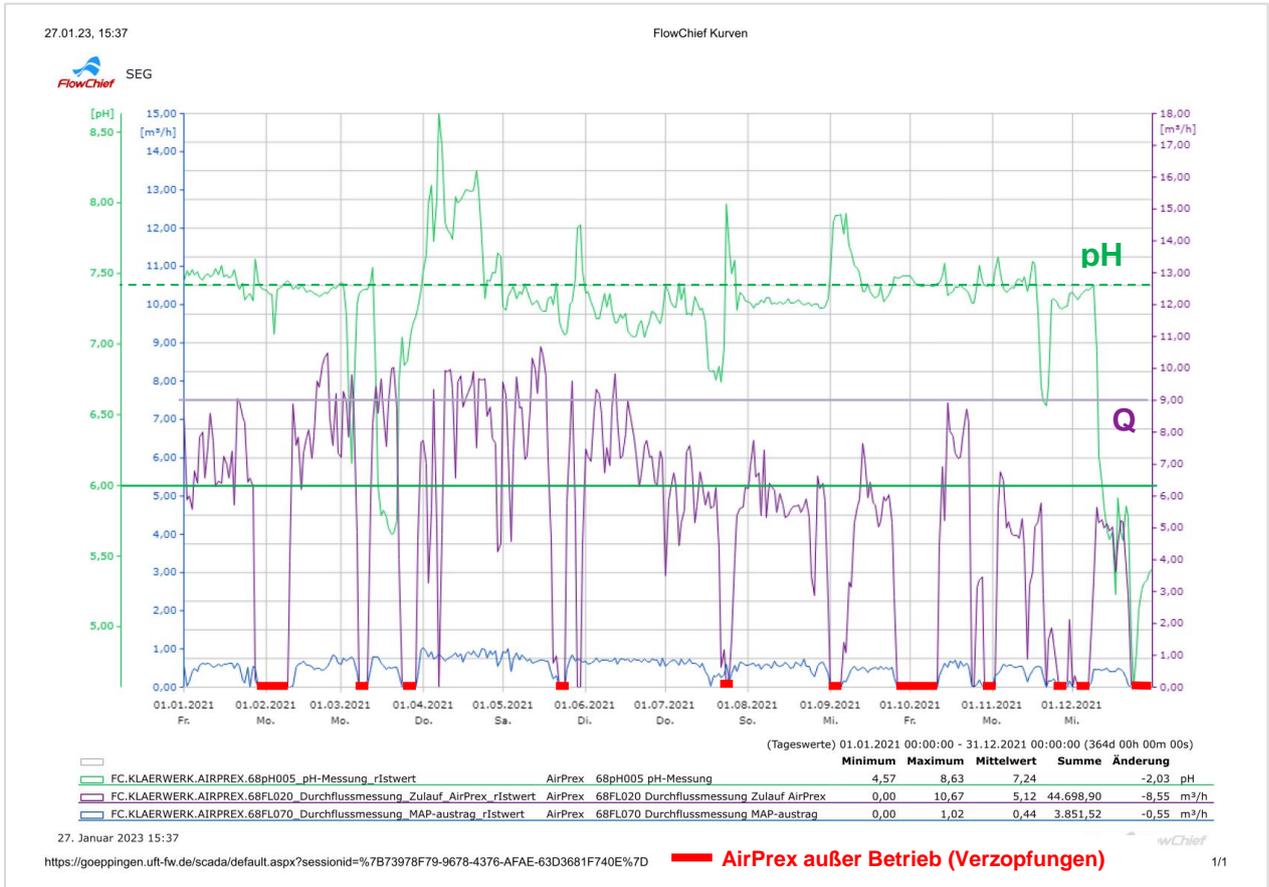


Abbildung 25: Betriebsparameter der MAP-Anlage im Jahresgang 2021 (Flow Chief)

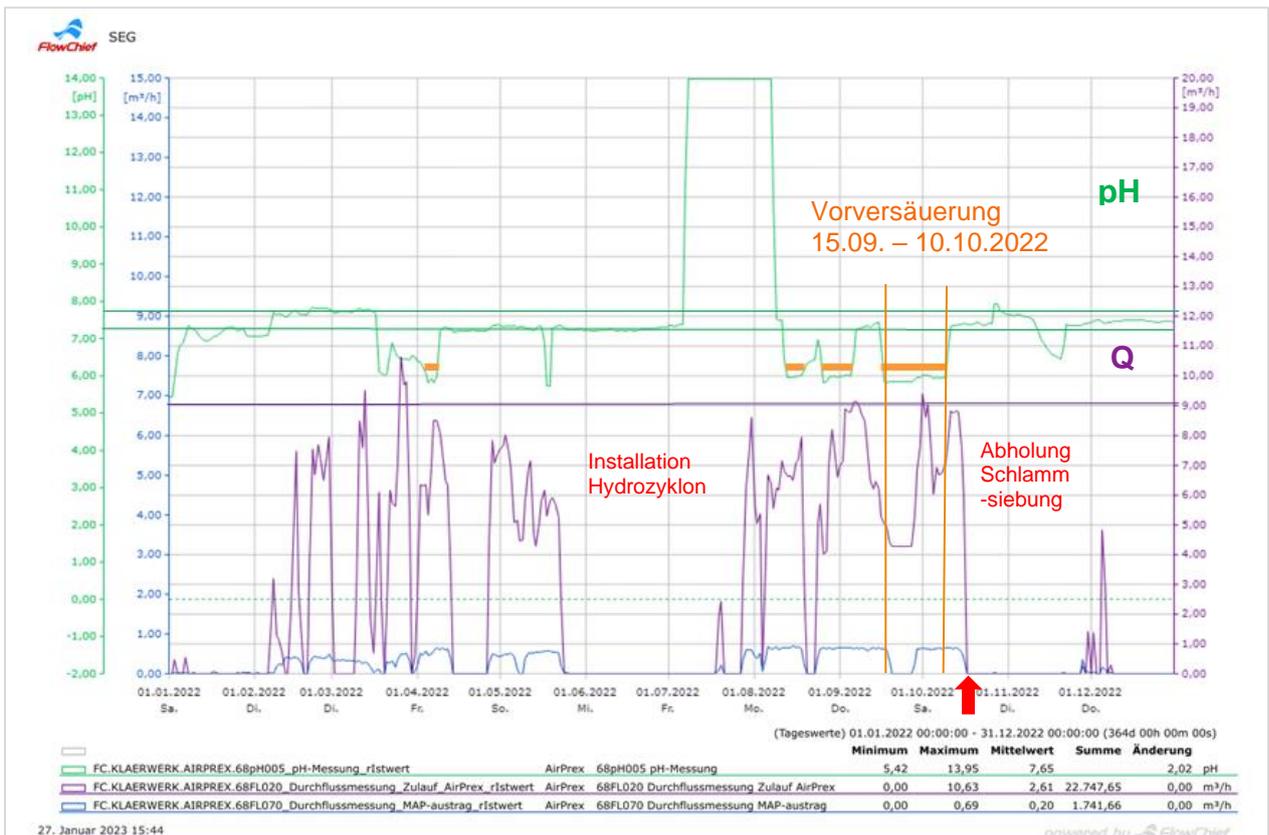


Abbildung 26: Betriebsparameter der MAP-Anlage im Jahresgang 2022 (Flow Chief)

Ohne Vorversäuerung schwankte der pH-Wert im Zulauf der MAP-Anlage zwischen pH 7,4 und 7,6.

Insgesamt wurden in der MAP-Anlage 44.364 m<sup>3</sup> Faulschlamm (2021) bzw. 22.410 m<sup>3</sup> Faulschlamm (2022) durchgesetzt. Dies entspricht in 2021 einem Durchsatz von 65% der Jahresmenge Faulschlamm und 2022 von 31%.

Die zwei Betriebsphasen der MAP-Anlage in 2022 sind am gesenkten Phosphatgehalt des Filtrates deutlich erkennbar, d.h. die Fällung als MAP ist verfahrens- und betriebs-technisch kein Problem und senkt auf jeden Fall die Rückbelastung der Belebungsanlage mit rückgeführtem Phosphat im Filtrat der Kammerfilterpresse.

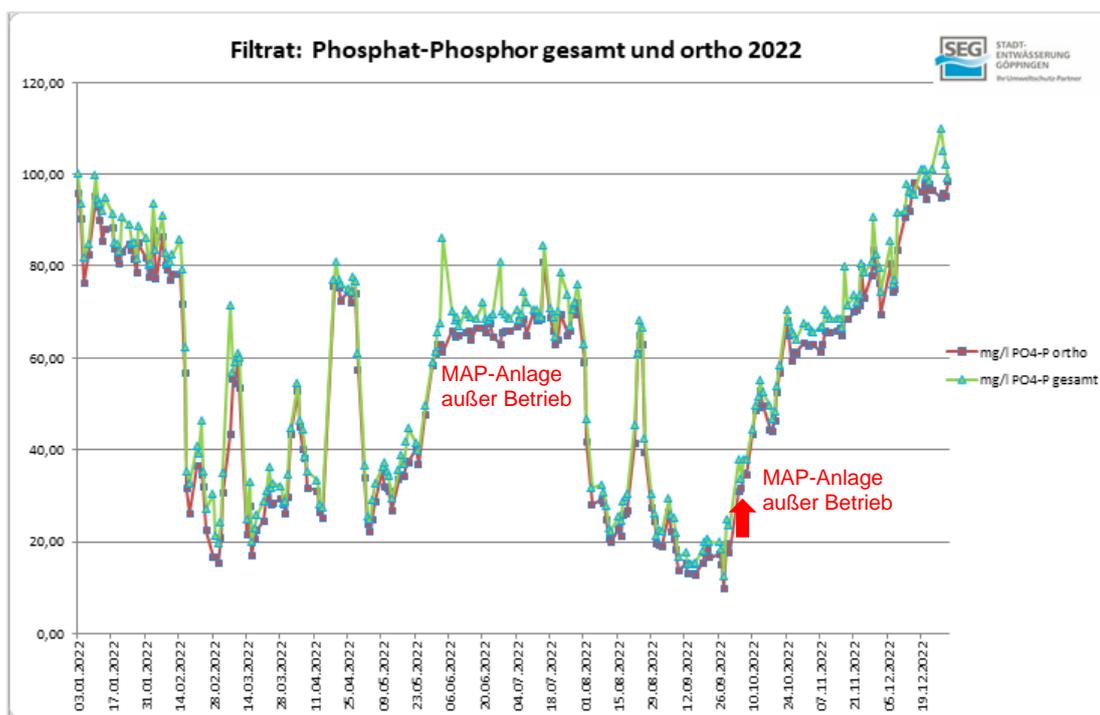


Abbildung 27: Phosphatgehalt im Filtrat der Kammerfilterpresse 2022 (Eigenkontrolle SEG)

#### 5.4 Chemikalienverbräuche

Da die Dosierkurven nach den Aufzeichnungen des Flow Chiefs (hier nicht abgebildet) wiederholt auf Übertragungsfehler im PLS hinwiesen, wurden die spezifischen Verbräuche aller Chemikalien im Rahmen der durchgeführten Versäuerungsversuche aus den Füllständen der Lagertanks ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der ersten Versuchsphase über 9 Tage ein niedrigerer pH-Wert erreicht wurde (pH 5,7) als in der zweiten, wesentlich längeren Meßkampagne (26 Tage) bei pH 6. Die Werte sind also aus diesem Grunde nicht direkt vergleichbar.

Tabelle 4: Spezifische Chemikalienverbräuche bei Vorversäuerung (2021, 2022)

MAP-Fällung mit Vorversäuerung	1. Versuch	2. Versuch
Zeitraum	14.03.- 22.03.2021	16.09. -10.10.2022
Dauer	9 Tage	26 Tage
Faulschlamm (m <sup>3</sup> )	1.590	4.260
pH	5,76 (4,01 – 7,63)	6,02 (5,41 - 7,46)
<b>Verbräuche absolut</b>		
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> )	14,21	17,04
MgCl <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> )	4,62	18,68
NaOH (m <sup>3</sup> )	7,02	14,16
<b>Verbräuche spezif.</b>		
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l/m <sup>3</sup> FS)	8,9	4,0
MgCl <sub>2</sub> (l/m <sup>3</sup> FS)	2,9	4,4
NaOH (l/m <sup>3</sup> FS)	4,4	3,3

Ausgehend von den spezifischen Verbräuchen der 2. Messkampagne lassen sich die Jahresverbräuche für das Betriebsjahr 2022 wie folgt hochrechnen:

Tabelle 5: Jahresverbräuche an Chemikalien bei Betrieb mit Vorversäuerung (Hochrechnung)

Jahresverbräuche an Chemikalien bei Vorversäuerung auf pH 6		
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	[m <sup>3</sup> /a]	283,4
MgCl <sub>2</sub>	[m <sup>3</sup> /a]	311,7
NaOH	[m <sup>3</sup> /a]	233,8
Faulschlamm 2022	[m <sup>3</sup> /a]	70.850

Hinzu kommt eine bislang nicht kalkulierte Menge Entschäumer, der bei der Vorversäuerung erforderlich werden kann. Der Verbrauch kann aus dem bisherigen Versuchsbetrieb nur grob geschätzt werden, da die Dosierung nach Bedarf und per Handbetrieb aus IBC-Containern erfolgte. Von der SEG wurden folgende Einkaufsmengen genannt:

Betriebsjahr 2020:                    gesamt 2.150 kg  
 Betriebsjahr 2021:                    2.900 kg

## 5.5 Stromverbräuche

Für das Betriebsjahr 2022 wurden von der SEG die Stromverbräuche für die Pondus- und die MAP-Anlage angegeben (Tabelle 6).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der MAP-Anlage nur rd. 30 % des gesamten Faulschlammes behandelt wurde.

Tabelle 6: Jahresstrombedarf Pondus- und MAP-Anlage 2022

	<b>MAP</b>	<b>Pondus</b>
	<b>[kWh/Mon]</b>	<b>[kWh/Mon]</b>
Januar	1.055	3.385
Februar	3.446	3.350
März	5.055	3.200
April	4.307	4.707
Mai	4.734	4.583
Juni	271	1.908
Juli	994	2.264
August	6.135	4.861
September	7.303	4.607
Oktober	6.700	4.900
November	5.182	2.691
Dezember	3.321	1
<b>gesamt</b>		
<b>[kWh/a]</b>	<b>48.503</b>	<b>40.457</b>

## 5.6 MAP-Ausbeute

Zu Beginn des Betriebsjahres 2020 wurde in der MAP-Anlage bei konventioneller Betriebsweise (ohne Vorversäuerung) und niedrigen Phosphatgehalten im Faulschlamm (70-90 mg/l PO<sub>4</sub>-P) erfolgreich MAP abgeschieden. Ende des Jahres kam die Abscheidung von MAP zunächst zum Erliegen und setzte erst im Juli 2021 wieder ein.

Das als Feuchtmasse aus dem MAP-Wäscher in einen Container abgeworfene, dunkelgraue Material (Abbildung 28) enthält neben organischen Reststoffen noch einen unbekanntem Anteil Restwasser. Es wird (ohne weiteres Zutun) an der Luft getrocknet. Das luftgetrocknete Material hat eine hellgraue Farbe und fühlt sich sandig an. Unter dem Mikroskop sind die typischen MAP-Kristalle in Sargdeckelform erkennbar (Abbildung 28).

In den Aufzeichnungen des Flow Chiefs wird als MAP-Austrag die abgezogene Menge aus dem MAP-Reaktor in den Sandwäscher aufgezeichnet (Abbildungen 25,26: blaue

Kurve = MAP-Austrag). Die sich daraus ergebende Menge an luftgetrocknetem Struvit (MAP) muss durch Wiegen ermittelt werden. Aus dieser Menge wiederum kann die MAP-Ausbeute bei Kenntnis der Zusammensetzung (Anteil MAP, Sand, Organik) und des Restwassergehaltes des luftgetrockneten Materials rechnerisch ermittelt werden (siehe wissenschaftlicher Bericht ISWA).



Abbildung 28: Struvit (MAP) im Abwurfcontainer und typische Sargdeckelform unter dem Mikroskop.

## 6 Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb (Nebeneffekte)

Die Versuchsanlage hat zum Ziel, den Phosphorgehalt im Klärschlamm unter 20 g P/kg TM zu senken. Darüber hinaus ergeben sich möglicherweise weitere Effekte im Bereich der Schlammbehandlung, die als Nebeneffekte (Synergieeffekte) zu betrachten sind.

Folgende Nebeneffekte können in Zusammenhang mit dem Betrieb der Versuchsanlage auftreten und in den Betriebsdaten zum Ausdruck kommen:

- Glühverlust im Faulschlamm sinkt (↓)
- Faulgasmenge steigt (↑)
- Stromerzeugung (als Ausdruck des Methangehaltes) steigt (↑)
- Verbrauch Co-Substrat sinkt (↓)
- TS-Gehalt Filterkuchen steigt (↑)
- Polymerverbrauch sinkt (↓)
- Rückbelastung Belebungsanlage durch PO<sub>4</sub>-P im Filtrat sinkt (↓)

Bei der Betriebsdatenauswertung ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Schlamm-mengen als auch die Schlammqualitäten in den Jahre 2020 und 2021 vor allem in den Sommermonaten durch die Corona-Pandemie und die damit verbundenen Reisebe-schränkungen verändert sein dürften.

Auf der Suche nach Effekten auf die Schlammbehandlung ist außerdem zu berücksichti-gen, dass ein stabiler Dauerbetrieb der Versuchsanlage selbst in 2022 noch nicht etab-liert werden konnte, so dass die erwarteten Nebeneffekte nicht voll ausgeprägt sein dürf-ten und sich möglicherweise nur tendenziell andeuten.

### 6.1 Datenerfassung / Betriebstagebuch

Auf der Kläranlage werden die Betriebsdaten über das Programm „Acron“ erfasst, archi-viert und ausgewertet. Die Anbindung an das neue Prozessleitsystem (Flow Chief) ist noch nicht abgeschlossen, so dass die Daten zur Schlammbehandlung aus den parallel geführten Excel-Tabellen des *Schlammstagebuches* übertragen werden.

Die Faulgasmenge wird durch mehrere Messungen erfasst:

- Einzelmessungen Gasanfall Faulbehälter 1+2
- Gesamtgasmenge
- Gasverbrauch BHKW 1+2

Die Gesamtgasmenge und die Gasverbräuche der BHKWs werden nur im *Energiebericht* dokumentiert, während die Einzelmesswerte der Faulbehälter 1-2 in *Acron* eingepflegt werden. Die verschiedenen Daten zur Faulgasmenge weichen z.T. voneinander ab und sind nicht immer in Übereinstimmung zu bringen.

Eine gute und langjährige Übersicht über die Betriebsverhältnisse der Schlammbehandlung geben die *Jahresberichte*, die im Auftrag der Stadt Göppingen durch das Ingenieurbüro Jedele und Partner (JuP) erstellt werden. Zusätzlich zu den Jahresberichten, die jeweils die Entwicklung der letzten drei Jahre bewerten, wird von JuP ein *Entwicklungsbericht* ab 2012 geführt, so dass die Entwicklung auch über einen sehr langen Zeitraum betrachtet werden kann.

Auf der Grundlage der Berichte von Jedele und Partner werden im Folgenden die Auswirkungen der Versuchsanlage auf die Betriebsverhältnisse der Kläranlage 2021 näher betrachtet.

## 6.2 Kennzahlen Faulschlamm

Die vorgeschaltete Desintegration von Überschussschlamm soll den anschließenden Abbau in der Faulung verbessern, was in einem verminderten Glühverlust des Faulschlammes zum Ausdruck kommen kann.

In Tabelle 7 sind die Kennzahlen der Faulung für die letzten 10 Jahre wiedergegeben (Entwicklungsbericht 2012-2021, JuP).

Der Glühverlust des Faulschlammes ist 2021 im Vergleich zum Vorjahr weiter auf 52 % gesunken und hat somit den Tiefstwert aus dem Jahr 2013 nahezu wieder erreicht. Dieser Effekt entspricht den Erwartungen, sollte sich aber in den weiteren Erhebungen für das Betriebsjahr 2022 noch bestätigen.

Tabelle 7: Betriebsdaten zur Faulung (Entwicklungsbericht 2012-2021, JuP)

Jahr	Mittelwerte Faulung				
	Faulzeit d	Temp. °C	TS %	GV %	org. Säuren mg/l
2012	27	37,8	2,6	57	474
2013	26	38,0	2,9	51	835
2014	25	37,3	2,9	55	802
2015	26	36,1	2,8	55	756
2016	31	36,0	3,0	54	745
2017	32	36,4	3,1	55	627
2018	32	37,2	3,5	54	679
2019	35	35,8	3,4	55	667
2020	32	36,7	3,3	53	556
2021	31	36,4	3,4	52	790

10 J	
------	--

Gasanfall 2019 aus ACRON-Daten (Summe Verbraucher = BHKW + Heizung + Fackel), 2020-2021 aus Energiebericht

ACRON-Daten enden im Mai 2020

Fußnote 1) = E (Einwohner) nach DWA-A 216 aus mittlerer CSB-Fracht und 120 g CSB/(E\*d)

Der Gehalt an organischen Säuren ist stark angestiegen, was in Göppingen bereits in den Vorjahren wiederholt der Fall war. Allerdings ist der starke Anstieg von 2020 (556 mg/l) auf 2021 (790 mg/l) auffällig und könnte auf einen Effekt der Desintegration hinweisen.

Jedele und Partner haben in der Vergangenheit eine mögliche Ursache in der Zugabe von Co-Substrat vermutet. Co-Substrat wurde jedoch in 2020 und 2021 nur in unverändert geringer Menge dosiert, so dass die Ursache hierin kaum zu suchen ist.

Im Jahresbericht 2021 spricht das Ingenieurbüro JuP die erhöhten Gehalte an organischen Säuren im Faulschlamm als analytisches Problem an, indem mit anderen Analyseverfahren geringere Werte ermittelt werden. Dieser Punkt müsste erst durch Parallelmessungen weiter abgeklärt werden, bevor weitere Schlüsse gezogen werden können.

### 6.3 Faulgasmenge

Die Pondus-Anlage ging bereits Ende 2019 in Betrieb. Im folgenden Betriebsjahr 2020 stieg der Jahresanfall an Faulgas um rd. 346.000 m<sup>3</sup> auf insgesamt rd. 2.123.000 m<sup>3</sup>/a. Dies entspricht einer Steigerung gegenüber dem Vorjahr um nahezu 20%.

Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in 2020 aufgrund der Corona-Pandemie alle Reiseaktivitäten zum Erliegen kamen und die Bevölkerung weitestgehend zu Hause bleiben musste. Zusätzlich kam es zu Betriebseinschränkungen mit Kurzarbeit, was sich auf den Zufluss industriellen Abwassers zur Kläranlage ausgewirkt haben kann. Insofern ist die Zunahme des Jahresgasanfalls möglicherweise eher ein Effekt der Corona-Pandemie, als ein Effekt der Desintegration des Überschussschlammes.

Tabelle 8: Kennzahlen zum Faulgasanfall (Entwicklungsbericht 2012-2021, JuP)

Jahr	Gasanfall		
	Jahr (Summe) m <sup>3</sup> /a	Tag (Mittel) m <sup>3</sup> /d	spezifisch l/E*d <sup>1)</sup>
2012	1.981.495	5.429	27,7
2013	2.044.000	5.600	28,0
2014	1.721.598	4.717	23,6
2015	1.657.062	4.540	20,2
2016	1.623.890	4.449	22,2
2017	1.921.556	5.265	23,5
2018	1.837.100	5.033	23,3
2019	1.777.004	4.869	21,8
2020	2.123.017	5.816	27,0
2021	2.076.199	5.688	28,4

10 J	
------	--

Gasfall 2019 aus ACRON-Daten (Summe Verbraucher = BHKW + Heizung + Fackel), 2020-2021 aus Energiebericht  
ACRON-Daten enden im Mai 2020  
Fußnote 1) = E (Einwohner) nach DWA-A 216 aus mittlerer CSB-Fracht und 120 g CSB/(E\*d)

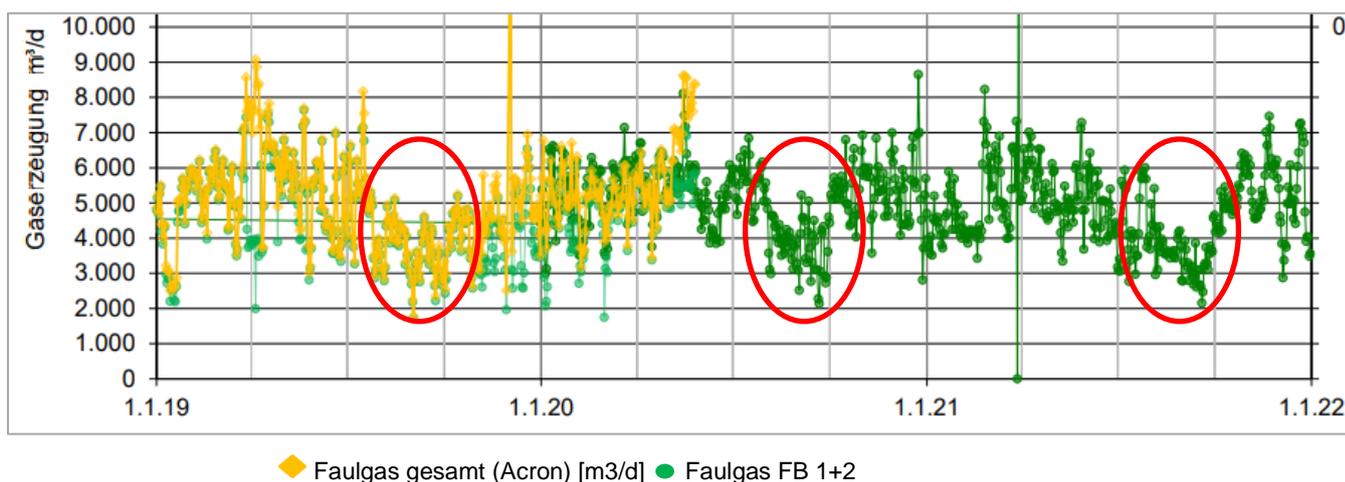
Im darauffolgenden Betriebsjahr 2021 fiel die Jahresmenge an Faulgas wieder leicht um rd. 47.000 m<sup>3</sup> auf 2.076.199 m<sup>3</sup>/a ab. Trotzdem erhöhte sich die einwohnerspezifische Gasproduktion von 27 l/E\*d (2020) auf 28,4 (2021) und überschreitet damit den bislang höchsten Wert aus dem Jahr 2013 (28,0 l/E\*d) leicht. Darin könnte ein Effekt der vorge-schalteten ÜS-Desintegration zum Ausdruck kommen.

Ob der Effekt anhält, muss die Betriebsdatenauswertung 2022 zeigen.

#### 6.4 Faulgas im Jahresgang

Die Faulgaserzeugung zeigt in Zusammenhang mit der einbrechenden Schlammproduk-tion ab Juli den erwarteten Abfall im Herbst. Dies trifft unverändert auch für die Corona-Jahre 2020 und 2021, obwohl der Reiseverkehr durch die Pandemie stark (2020) bzw. merklich (2021) eingeschränkt war.

Zur Stützung der Gasproduktion wurden in dieser Zeit geringe Mengen an Co-Substrat in die Faulung dosiert, das an der gesamten Gasproduktion jedoch nur einen Anteil von weniger als 1% ausmacht.



Gasanfall 2019 aus ACRON-Daten (Summe Verbraucher = BHKW + Heizung + Fackel), 2020-2021 aus Energiebericht  
 ACRON-Daten enden im Mai 2020

Abbildung 29: Faulgasproduktion im Jahresgang 2019 – 2021 (Jahresbericht 2021, JuP)

#### 6.5 Faulgasnutzung

Im Jahr 2020 wurde das anfallende Faulgas nahezu vollständig in den beiden BHKWs verwertet, während im Jahr 2021 mehr Gas vom Heizkessel verbraucht wurde (Tabelle 9). Nach Rücksprache mit dem Betriebspersonal resultiert diese Steigerung in 2021 nicht aus dem Betrieb der Pondus-Anlage, sondern aus Wartungsarbeiten und dadurch bedingten Stillstandzeiten der BHKWs, in denen die erforderliche Wärme für den Klärwerksbetrieb automatisch über die Heizungsanlage zur Verfügung gestellt wird.

Tabelle 9: Betriebsdaten zur Faulgasnutzung (Entwicklungsbericht 2012-2021, JuP)

Jahr	Klärgas								Co-Substrat <sup>1)</sup>			
	BHKW		Heizung		Fackel		gesamt	~ ohne Co-S.	Menge	spezif	Gas	Anteil
	m³/a	%	m³/a	%	m³/a	%	m³/a	m³/a	m³/a	m³/m³	m³/a	%
2012	1.465.123	74	261.885	13	222.065	11	<b>1.981.495</b>	1.892.592	165	540	88.903	4
2013	2.033.937	100	0	0	10.063	0	<b>2.044.000</b>	1.609.538	1.738	250	434.462	21
2014	1.718.407	100	0	0	3.191	0	<b>1.721.598</b>	1.571.991	598	250	149.607	9
2015	1.648.971	100	0	0	8.091	0	<b>1.657.062</b>	1.484.812	689	250	172.250	10
2016	1.372.880	85	184.895	11	66.115	4	<b>1.623.890</b>	1.591.765	129	250	32.125	2
2017	1.826.601	95	57.031	3	37.923	2	<b>1.921.556</b>	1.921.556	0		0	0
2018	1.783.154	97	25.730	1	28.206	2	<b>1.837.090</b>	1.837.090	0		0	0
2019	1.641.782	92	103.321	6	31.878	2	<b>1.776.981</b>	1.776.981	0		0	0
2020	2.017.358	95	90.592	4	15.067	1	<b>2.123.017</b>	2.100.222	91	250	22.795	1
2021	1.820.201	88	248.810	12	7.188	1	<b>2.076.199</b>	2.052.607	94	250	23.593	1

1) 2009 bis 2012: 600 g CSB/l, 900 l Gas/kg CSB = 540 m³ Gas, 2013-2021: min-Wert lt. Produktinformation

## 6.6 Entwässerter Klärschlamm (zur Entsorgung)

Der Jahresbericht 2021 zeigt, dass die Klärschlammmenge gegenüber dem Vorjahr 2020 um 350 t Filterkuchen bzw. 100 t Trockensubstanz abgenommen hat.

Gleichzeitig sind der TS-Gehalt im entwässerten Klärschlamm von 23,3 % auf 24 % und der einwohnerspezifische Schlammanfall von 24 auf 25 g TS/EW\*d leicht gestiegen, was tendenziell den erwarteten Nebeneffekten der Versuchsanlage entspricht.

Allerdings wurde 2021 zum Erreichen des höheren TS-Gehaltes auch wesentlich mehr Polymer in der Schlammmentwässerung eingesetzt, indem pro Tonne Trockensubstanz 19,9 kg Wirksubstanz (WS) (2021) anstatt 13,5 kg Wirksubstanz (2020) aufgewendet wurde.

Tabelle 10: Entwässerter Klärschlamm zur Entsorgung (Jahresbericht 2021, JuP)

Jahr	Klärschlamm entwässert				Polymer entw. spezifisch kg WS / t TS
	t KS/a	%	t TS/a	spezifisch g TS/EW*d	
2019	10.071	22,1	2.228	22	17,8
2020	10.432	23,3	2.428	24	13,5
2021	9.718	24,0	2.327	25	19,9
10 J					

## 6.7 Rückbelastung Belebungsanlage (PO<sub>4</sub>-P im Filtrat)

Um die Faulschlammleitungen vor MAP-Ablagerungen zu schützen, wurde bis ins Jahr 2014 Eisenchlorid (FeCl<sub>3</sub>) zur Fällung von gelöstem Phosphat auch in die Faulbehälter dosiert. Der mittlere Gehalt von gelöstem Phosphat im Filtrat der Kammerfilterpresse wurde durch diese Maßnahme künstlich bei im Mittel 20-30 mg/l gehalten.

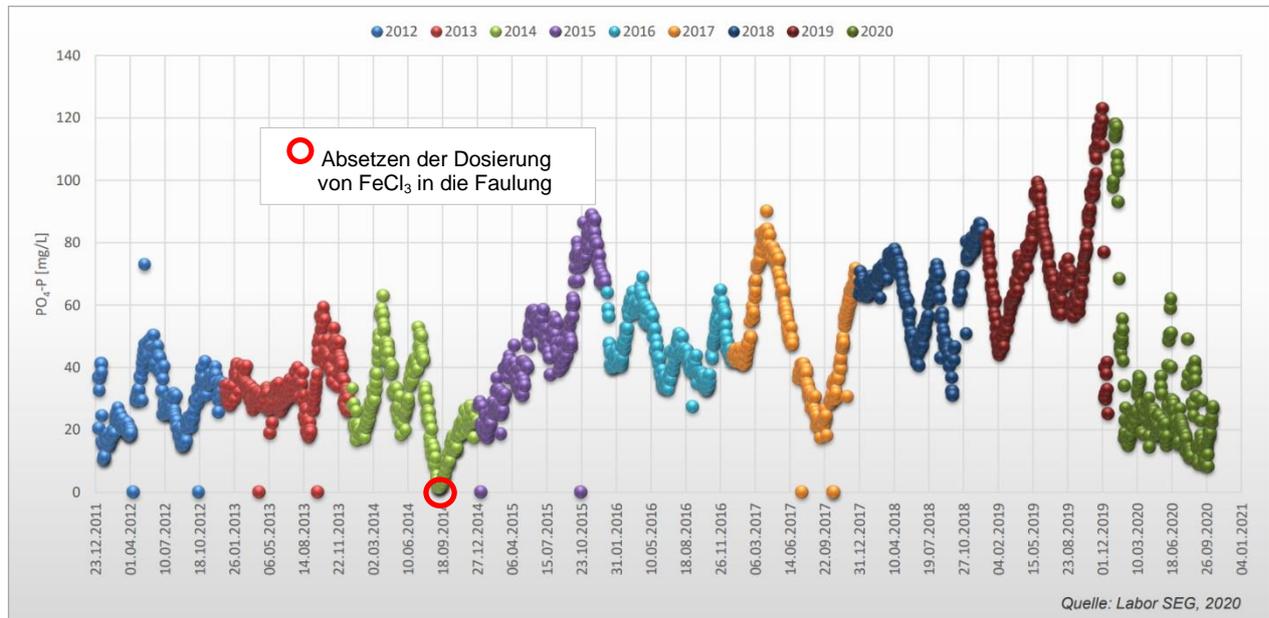


Abbildung 30: Phosphatgehalt (PO<sub>4</sub>-P) im Filtrat der Kammerfilterpresse (2011-2020)

Ab Oktober 2014 wurde diese Dosierung im Hinblick auf die angestrebte Phosphor-Rückgewinnung aus Faulschlamm eingestellt, um den Gehalt an gelöstem Phosphat auf eine, für die MAP-Fällung angestrebte Zielkonzentration von 100 mg/l PO<sub>4</sub>-P anzuheben. Dieser Anstieg erfolgte unerwartet langsam über eine Dauer von drei Jahren, wobei der Phosphatgehalt im Filtrat aus bisher ungeklärten Gründen im Jahresverlauf stark schwankt: Immer wenn ein Maximalwert erreicht ist, fällt die Konzentration unmittelbar wieder stark ab, um sich im Anschluss langsam wieder bis zum Grenzwert aufzubauen (Abbildung 30, siehe auch Bericht zur wissenschaftliche Begleitung).

Mit Betrieb der Versuchsanlage ab 2020 ist der PO<sub>4</sub>-P-Gehalt im Filtrat und damit die Rückbelastung der Belebungsanlage dauerhaft zurückgegangen. Bei Betrieb der MAP-Anlage wird das gelöste Phosphat (PO<sub>4</sub>-P) aus dem Faulschlammwasser gefällt, so dass der PO<sub>4</sub>-P-Gehalt im Filtrat sinkt. Dieser Effekt als Ausdruck einer erfolgreichen Phosphatfällung in Form von MAP ist seit Inbetriebnahme des MAP-Reaktors am 04.12.2019 deutlich erkennbar (siehe Pkt. 5.3, Abbildung 24).

In den Jahresberichten von Jedele und Partner kommen die Schwankungen des Phosphatgehaltes im Filtrat bei der Betriebsdatenauswertung ebenfalls zum Ausdruck: So steigt der mittlere PO<sub>4</sub>-P-Gehalt im Filtrat ab 2014 bis auf 77 mg/l im Jahr 2019 an, um mit Inbetriebnahme der MAP-Anlage Ende 2019 deutlich abzufallen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Mittlere Phosphatgehalte im Filtrat der Kammerfilterpresse (Entwicklungsbericht JuP)

- 2014 - P<sub>ges</sub> im Mittel 28 mg/l (7 bis 58 mg/l)
- 2015 - P<sub>ges</sub> im Mittel 56 mg/l (22 bis 91 mg/l)
- 2016 - P<sub>ges</sub> im Mittel 50 mg/l (30 bis 73 mg/l)
- 2017 - P<sub>ges</sub> im Mittel 53 mg/l (21 bis 104 mg/l)
- 2018 - P<sub>ges</sub> im Mittel 67 mg/l (34 bis 94 mg/l)
- 2019 - P<sub>ges</sub> im Mittel 77 mg/l (28 bis 124 mg/l)
- 2020 - P<sub>ges</sub> im Mittel 35 mg/l (11 bis 122 mg/l)
- 2021 – P<sub>ges</sub> im Mittel 32 mg/l (11 bis 99 mg/l)

Die entsprechende Jahresganglinie des Flow Chiefs aus dem Betriebsjahr 2021 zeigt, dass die MAP-Fällung zu Jahresbeginn relativ stabil war und im Verlauf des Jahres wegen auftretender Betriebsprobleme insgesamt 11 x außer Betrieb genommen werden musste (Abbildung 25).

Zum Jahresende dauerten diese Störphasen wegen der zunehmenden Verstopfungen und den daraufhin erforderlichen Reinigungsmaßnahmen in allen Anlagenteilen zunehmend länger an. Bei längeren Stillstandzeiten wird der Ausgangsgehalt an PO<sub>4</sub>-P im Faulwasser (hier 80 mg/l) auch im Filtrat nahezu wieder erreicht.

Anmerkung: Aus Abbildung 31 geht hervor, dass der Gehalt an Phosphat-Phosphor (PO<sub>4</sub>-P) und Gesamt-Phosphor (P<sub>ges</sub>) im Filtrat nahezu gleich sind und somit synonym verstanden werden können.

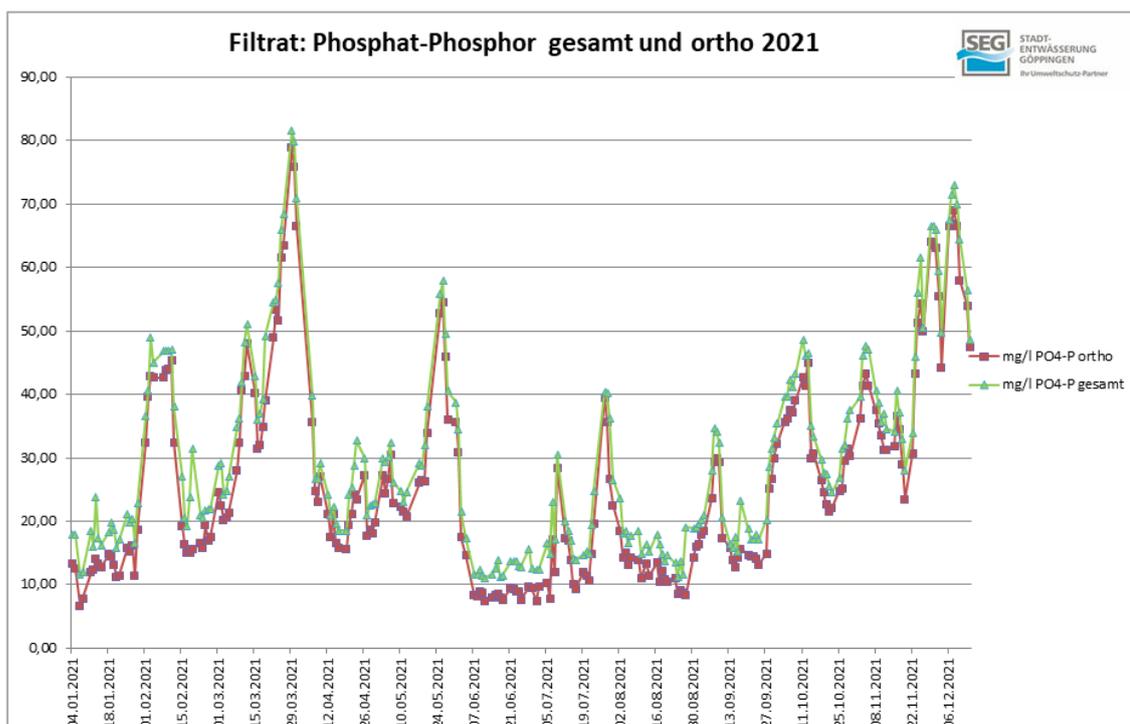


Abbildung 31: Phosphatgehalt (PO<sub>4</sub>-P) im Filtrat der Kammerfilterpresse 2021 (Labor SEG)

Für die Rückbelastung der Belebungsanlage mit Phosphat aus der Schlammentwässerung bedeutet dies, dass die MAP-Fällung zur Senkung der P-Rückbelastung der Belebungsanlage und somit zur Einsparung von Fällmittel beiträgt.

## 6.8 P-Gehalt im Klärschlamm zur Entsorgung

Im langjährigen Entwicklungsbericht von Jedele und Partner werden auch die Untersuchungsergebnisse der 2x im Jahr durchgeführten Klärschlammuntersuchung seit 2012 erfasst (Tabelle 12).

Ausgehend von einem mittleren P-Gehalt von 22,7 g P/kg TS zu Beginn der Planungen für die Versuchsanlage auf dem Klärwerk Göppingen (Machbarkeitsstudie 2014, EFRE Antrag Ende 2016/Anfang 2017) hat sich der mittlere P-Gehalt in den Folgejahren auf 28,3 g P/kg TS deutlich erhöht. Bei der ersten Untersuchung aus dem Betriebsjahr 2022 lag er sogar erstmalig bei 30,2 g P/kg TS. Dieser bisherige Höchstwert ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf den Betrieb der Versuchsanlage zurückzuführen, da die MAP-Fällung zwar erfolgreich durchgeführt wurde, das gebildete MAP jedoch aufgrund mangelhafter Kristallisation nicht abgeschieden werden konnte. In der Folge führten die im Klärschlamm verbliebenen Mikrokristalle zur Erhöhung des P-Gehaltes und somit zu einem Effekt entgegen der angestrebten P-Abreicherung des Klärschlammes.

Tabelle 12: Phosphor-Gehalt im entwässerten Klärschlamm zur Entsorgung (Entwicklungsbericht, JuP, ergänzt durch iat)

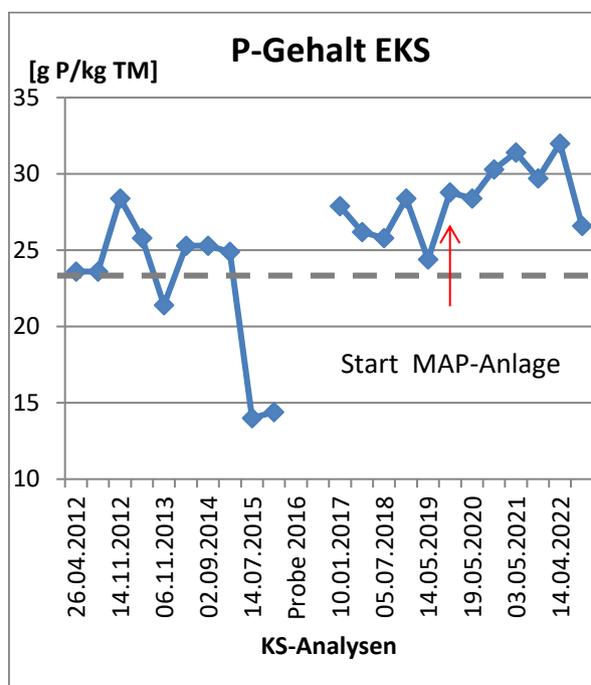


Abbildung 32: Phosphor-Gehalt im entwässerten Klärschlamm zur Entsorgung (Entwicklungsbericht, JuP, ergänzt durch iat)

Klärschlammuntersuchung Ergebnisbericht vom	P-Gehalt im Klärschlamm [g P/kg TS]
26.04.2012	23,6
12.07.2012	23,6
14.11.2012	28,4
26.04.2013	25,8
06.11.2013	21,4
02.04.2014	25,3
02.09.2014	25,3
04.02.2015	24,9
14.07.2015	14,0
19.11.2015	14,4
<b>Mittelwert</b>	<b>22,67</b>
2016 ?	
10.01.2017	27,9
04.05.2018	26,2
05.07.2018	25,8
13.12.2018	28,4
14.05.2019	24,4
21.11.2019	28,8
19.05.2020	28,4
26.11.2020	30,3
03.05.2021	31,4
12.11.2021	29,7
14.04.2022	32,0
18.10.2022	26,6
<b>Mittelwert</b>	<b>28,3</b>

## 7 Zusammenfassung

Die Versuchsanlage auf dem Klärwerk Göppingen zur Rückgewinnung von Phosphor aus Faulschlamm in Form von MAP wurde 2019 errichtet und 2020 in Betrieb genommen. Die Inbetriebnahme mit anschließendem Probe- und Optimierungsbetrieb wurde stark beeinträchtigt durch die seit 2020 anhaltende Corona-Pandemie und die Umrüstung des gesamten Prozessleitsystems auf der Kläranlage.

Die aufgetretenen Betriebsprobleme ergaben sich im Wesentlichen aus

- der direkten Anbindung neuer Verfahrensschritte an den bestehenden Betrieb der Schlammbehandlung
- der innovativen Anbindung der sauren Hydrolyse an das MAP-Fällungsverfahren und
- der Umstellung der Vorversäuerung von einem Batch-Betrieb auf eine kontinuierliche Betriebsweise.

Vor diesem Hintergrund ergaben sich folgende zu lösende Aufgaben:

### 1. Anlagentechnik

#### Vorlagebehälter

Sowohl die Desintegrationsanlage (Pondus) als auch die MAP-Fällungsanlage (Airprex) mussten aus Platzmangel direkt, ohne puffernden Vorlagebehälter, an die bestehenden Anlagen der Schlammbehandlung angebunden werden. Dies hatte für beide Verfahrensschritte den Nachteil, dass die Zuflussmengen nicht ausreichend vergleichmäßig werden konnten. Belastungsspitzen über die Auslegungswerte hinaus führten zu Beeinträchtigungen des jeweiligen Anlagenbetriebs und konnten in beiden Fällen nur durch eine entsprechende Umgehungsleitung vermieden werden.

#### Verzopfungen

Massive Schwierigkeiten ergaben sich aus den, im Faulschlamm enthaltenen Faserstoffen, die in der MAP-Anlage zu massiven Verzopfungen und Verstopfungen führten. Ein störungsfreier Betrieb der Anlage ist ohne eine vorgeschaltete Schlammsiebung nicht möglich. Auf der anderen Seite werden durch die Schlammsiebung jedoch strukturgebende Faserstoffe entfernt, die bei der anschließenden Schlammentwässerung fehlen und diese damit erschweren.

#### Natronlaugeversorgung

Durch die Zusammenlegung der Natronlaugeversorgung von Pondus- und AirPrex-Anlage entstanden lange Leitungswege mit erhöhter Gefahr von Ablagerungen und Verstopfungen, was zu anhaltenden Schwierigkeiten in beiden Verfahrensstufen führt.

Zudem erwies sich die Überwachung der Verbrauchsmittel (Natronlauge) bzw. die bedarfsgerechte Versorgung beider Verfahrensschritte als schwierig, da die Anlagen in

räumlich und personell getrennten Arbeitsbereichen betrieben werden. Aus betriebstechnischer Sicht ist es deshalb angeraten, die Lagerbehälter für erforderliche Chemikalien möglichst anlagennah zu betreiben und zu überwachen.

## 2. Verfahrenstechnik

### 2.1. Desintegration von Überschussschlamm (Pondus)

#### Aufschlussrate

Die Desintegrationsanlage schließt die Zellen des Überschussschlammes thermisch und chemisch auf, erkennbar an einem Abfall des pH-Wertes durch Freisetzung organischer Säuren und einem Anstieg des gelösten CSB in der wässrigen Phase im Ablauf der Anlage.

In Göppingen lag die Aufschlussrate, gemessen im CSB-Anstieg, bei etwa 20%. Bei vergleichbaren Anlagen sind nach Angaben des Verfahrensgebers Aufschlussraten von 40% und mehr üblich.

Mögliche Ursachen für den verminderten Zellaufschluss können in der besonderen Zusammensetzung des industriell geprägten Überschussschlammes liegen und in der verminderten Aufschlusstemperatur unterhalb des Auslegungswertes.

Zur Verbesserung der Desintegrationsleistung soll deshalb das atb-Verfahren nachgerüstet werden.

#### Nebeneffekte Desintegration

Durch die vorgeschaltete Desintegration des Überschussschlammes vor der Faulung sind Nebeneffekte im Bereich der Schlammbehandlung möglich:

- Glühverlust im Faulschlamm fallend (↓)
- Faulgasmenge steigend (↑)
- TS-Gehalt im Filterkuchen steigend (↑)
- Polymerverbrauch zur Schlammentwässerung fallend (↓)
- Rückbelastung Belebungsanlage durch  $\text{PO}_4\text{-P}$  im Filtrat fallend (↓)

Diese Effekte sind nach Auswertung der Betriebstagebücher durch das Ingenieurbüro Jedele und Partner im Betriebsjahr 2021 tendenziell erkennbar, liegen aber zum Zeitpunkt der Berichtstellung durch den eingeschränkten Betrieb der Anlage unter der Erwartung und müssen sich im weiteren Dauerbetrieb noch bestätigen.

### 2.2. Faulschlammqualität

Auf dem Klärwerk Göppingen schwankt der Ausgangsgehalt an gelöstem Phosphat im Faulschlamm bzw. Faulwasser im Jahregang stark zwischen 30 und 140 mg/l  $\text{PO}_4\text{-P}$ .

Obwohl für die MAP-Fällung von einem Mindestgehalt von etwa 100 mg/l  $\text{PO}_4\text{-P}$  im Zulauf der MAP-Anlage ausgegangen wurde, konnte Struvit auch ohne Hydrolyse bei geringeren Ausgangskonzentrationen von 70 mg/l  $\text{PO}_4\text{-P}$  abgeschieden werden.

Dennoch erschweren die starken Schwankungen des Phosphatgehaltes im Zulauf der MAP-Fällungsanlage die Einstellung optimaler Aufschluss- und Fällungsbedingungen.

Gerade bei einem industriell geprägten Abwasser wie in Göppingen können Schwankungen in der Faulschlammqualität aus der Beschaffenheit des zufließenden Rohabwassers und den jahreszeitlichen Schwankungen der Schlammengen resultieren. So haben die Auswertungen der Betriebstagebücher ein markantes „Sommerloch“ mit Rückgang der Überschussschlammmenge, verlängerten Faulzeiten und Rückgang der Faulgasproduktion im Sommer und frühen Herbst deutlich gemacht.

### 2.3. Vorversäuerung (Saure Hydrolyse)

Die saure Hydrolyse erfolgt in Göppingen mit konzentrierter Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 76%). Die starke Säure ist sehr reaktiv und führt bei Zugabe zu Wasser zu heftigen chemischen Reaktionen unter starker Hitzeentwicklung. Aus diesem Grunde muss der Durchführung der Säurezugabe (Dosierstelle, Dosierdynamik) besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Bei der Vorversäuerung stellte sich die Bildung von Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) in einem arbeitskritischen Bereich als herausragendes Problem dar, das durch die Aufstellung der Versuchsanlage in einer geschlossenen Halle noch verschärft wurde.

Bei der Ansäuerung bildet nur zweiwertiger Schwefel (Oxidationsstufe S(II)) Schwefelwasserstoff. Andere Schwefelverbindungen, die beim Ansäuern nicht als S(II) vorliegen oder übergehen, wie z.B. Sulfate oder auch der Schwefel aus Schwefelsäure ( $\text{SO}_4^{2-}$ , S(VI)) sind hier also nicht von Bedeutung. Insofern ist der Einsatz von Schwefelsäure nicht zwangsläufig verantwortlich für die  $\text{H}_2\text{S}$ -Problematik in Göppingen und Massenbilanzierungen von Gesamtschwefel zur Einschätzung von Schwefelwasserstoff-Emissionen sind nicht zielführend.

Die  $\text{H}_2\text{S}$ -Bildung ist abhängig vom pH-Wert und tritt bei der hier betriebenen Ansäuerung von Faulschlamm auf pH 6 in jedem Fall auf, unabhängig vom Sulfatgehalt aus der Schwefelsäure.

In bestehenden Anlagen nach dem Stuttgarter Verfahren (Pilotanlage Offenburg, mobile Anlage der Fa. MSE) wird die Vorversäuerung von Faulschlamm mit Schwefelsäure im Batchbetrieb durchgeführt. Hier verflüchtigt sich der entstehende Schwefelwasserstoff nach einiger Zeit.

In der Versuchsanlage in Göppingen erfolgt die Ansäuerung im kontinuierlichen Betrieb, so dass mit dem frischen Faulschlamm fortlaufend reaktionsfähiger Schwefel nachgeliefert wird. Insofern ist eine ausreichende Abluftbehandlung zur Vermeidung von  $\text{H}_2\text{S}$ -Emissionen unumgänglich.

## 2.4. MAP-Gewinnung (AirPrex)

Bei diesem verfahrenstechnischen Schritt muss man drei Reaktionsschritte deutlich voneinander unterscheiden:

1. MAP-Fällung (→ **Fällungsrate**, Dosierverhältnis  $\text{MgCl}_2 = \beta$ -Faktor)
2. Kristallbildung und –reife
3. MAP-Abscheidung (→ **Abscheiderate**)

Nur unter optimalen Reaktionsbedingungen werden ausreichend große Kristalle gebildet, die sich aus dem Faulschlamm abtrennen und als Struvit (MAP) abscheiden lassen. In der Versuchsanlage Göppingen konnten zufriedenstellende Fällungsraten von 70-80% sicher erreicht werden (siehe Bericht ISWA). Unzureichend war jedoch die anschließende Kristallbildung und Kristallreife, die keine zufriedenstellende Abscheidung ermöglichte. Die gute Fällungsrate in Verbindung mit der anschließend unzureichenden Abscheiderate führte insgesamt zur Anreicherung des Klärschlammes mit Struvit. Damit wurde im Widerspruch zur Zielvorstellung eine Erhöhung des P-Gehaltes im Klärschlamm herbeigeführt.

Optimierungsmöglichkeiten liegen weiterhin im Betrieb des Hydrozyklons, der bis zum Ende des Versuchszeitraums noch nicht zufriedenstellend eingestellt war.

## 3. Betreuung (Personalbedarf)

Der Betreuungsaufwand für die Versuchsanlage konnte trotz großen Engagements des Klärwerkspersonals nicht in jedem Fall zufriedenstellend geleistet werden. Außerdem wurde der Versuchsbetrieb der Anlage durch zeitgleich erfolgende Umbauarbeiten im Klärwerk (z.B. Umbau Vorklärung, Umstellung Prozessleitsystem) und die erschwerten Arbeitsbedingungen unter Corona-Bedingungen (Personalengpässe, Lieferschwierigkeiten) stark belastet und zeitlich stark verzögert.

## 8 Fazit und Ausblick

Anlagentechnisch hat die Versuchsanlage in Göppingen ihre Funktionstüchtigkeit mit den erforderlichen Nachrüstungen

- Aktivkohle-Filter (Abluft)
- Schlammsiebung
- Hydrozyklon

unter Beweis gestellt. Nicht nachrüsten ließen sich die ebenfalls erforderlichen Vorlagebehälter zur Vergleichmäßigung der Zuflüsse.

Die Verfahrenstechnik ist aufgrund der Eingangsschwankungen

- sowohl in der Schlammbeschaffenheit (Schwankender Gehalt  $\text{PO}_4\text{-P}$  im Faulschlamm, Sommerloch ÜS im Sommer, Beschaffenheit Primärschlamm > Betrieb Faulung)
- als auch des Schlammaufschlusses (Rücklöserate bei saurer Hydrolyse)

aufwändig zu kontrollieren und schwierig zu beherrschen.

Für die Ausschleusung des Phosphors in Form von MAP stellt die Fällungsrate weniger ein Problem dar, als vielmehr die Abscheiderate.

Bei störungsfreiem Betrieb der MAP-Anlage lag die Fällungsrate bei etwa 70-80%, was den Phosphatgehalt im Filtrat dauerhaft senkt und somit die Rückbelastung der Belebungsanlage über das Filtrat reduziert.

Auch mit Nachrüstung eines Hydrozyklons zur Verbesserung der Kristallisation und somit der Abscheiderate von MAP ist es nicht gelungen, Struvit (MAP) in zufriedenstellendem Maße aus dem Schlamm zu entfernen. Obwohl hier noch Optimierungspotential vorhanden ist, bleibt fraglich, ob der Grenzwert der Klärschlammverordnung von 20 g P/kg TM sicher auf diesem Weg unterschritten werden kann, zumal die Rechtsfrage, ab wann der Grenzwert aus behördlicher Sicht als eingehalten gilt, noch nicht abschließend geklärt ist

Offene Fragen zum Vollzug der Klärschlammverordnung werden im Auftrag der Umweltministerien durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) geklärt, die am 10.02.2020 eine Vollzugshilfe herausgegeben hat. Eine Aktualisierung ist bereits für das 3. Quartal 2023 angekündigt.

Mit dem Schwerpunkt der Umsetzung der Klärschlammverordnung hat die LAGA eine Studie bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Auftrag gegeben. Die Ergebnisse zu dieser Studie „extraWert“ wurden 2022 veröffentlicht (UBA Texte 156/2022, 12/ 2022)

Um unter anderem die Frage nach sinnvollen Kriterien für die Einhaltung des Phosphor-Grenzwertes zu klären, wurde eine Messkampagne mit 9 kommunalen Klärschlämmen mit einem P-Gehalt nahe des Grenzwertes 20 g P/kg TM durchgeführt. Bei den monatlich durchgeführten Messungen zum P-Gehalt im Klärschlamm stellte sich heraus, dass dieser im Jahresgang um 4 bis 13 % schwankte. Abhängig von der Schwankungsbreite lag der P-Gehalt bei einigen Schlämmen abwechselnd über oder unter dem Grenzwert.

Auf der Basis dieser Messungen empfahl die BAM, Klärschlämme im Grenzbereich von 18 - 22 g P/kg TM in vorgegebenen zeitlichen Abständen zu beproben, z.B. 1x Monat, und aus den 12 Messungen pro Jahr eine Unterschreitung des Grenzwertes bei 7 maliger Unterschreitung festzustellen.

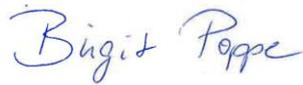
Diese Empfehlung wird in der LAGA aktuell diskutiert. Nach bisherigen Verlautbarungen aus dem Umweltministerium Baden-Württemberg tendieren die Vertreter der Umweltmi-

nisterien bislang dazu, eine 100% ige Einhaltung zu fordern, d.h. eine 12 malige Unterschreitung bei 12 Messungen.

Auf der Grundlage der Betriebserfahrungen mit der Versuchsanlage in Göppingen ist die Einhaltung des Grenzwertes vor dem Hintergrund der zu erwartenden, strengen Anforderung einerseits und den unvorhersehbaren Schwankungen in Klärschlammqualität, Aufschluss des Faulschlammes und Effizienz der P-Abreicherung andererseits nicht ausreichend sicher.

erstellt, Stuttgart im März 2023  
iat-Stuttgart GmbH  
Friolzheimer Straße 3A  
70499 Stuttgart

  
Rainer Röseler  
Geschäftsführer

i.A.   
Dr. rer. nat. Birgit Poppe  
Projektbearbeiterin

### Literaturverzeichnis

<p>Abwassertechnische Vereinigung Berlin: Ernst &amp; Sohn, ISBN 3-433-00905-8 3. Überarbeitete Auflage 1985 Zitiert in: <a href="https://publications.rwth-aachen.de/record/50037/files/Montag_David.pdf">aus https://publications.rwth-aachen.de/record/50037/files/Montag_David.pdf</a>: (Dissertation Montag, 2008)</p>	<p>Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band IV: Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung.</p>
<p>DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 2. Arbeitsbericht Korrespondenz Abwasser, Abfall Heft 10 und 11/2013</p>	<p>Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm</p>
<p>iat - Ingenieurberatung GmbH, Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Fa. Poll Umwelt- u. Verfahrenstechnik GmbH, Dr.-Ing. W. Maier Dipl.-Ing. A. Weideler, Dr.-Ing. J. Krampe, Prof. Dr.-Ing. U. Rott März 2005 <a href="https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-21042.pdf">https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-21042.pdf</a></p>	<p>Entwicklung eines Verfahrens zur Phosphat-Rückgewinnung aus ausgefaultem Nassschlamm oder entwässertem Faulschlamm als gut pflanzenverfügbares Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)</p>
<p>Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft Arbeitsbereich Emissionen (EMS) Dipl.-Ing. D. Morrison Dr.-Ing. M. Reiser 07.08.2020 (unveröffentlicht)</p>	<p>Bericht zur Bestimmung der Konzentration an Schwefelwasserstoff im Abgas einer Versuchsanlage bei der KA Göppingen im Auftrag der iat Ingenieurberatung, Stuttgart Messungen vom 25.06.2020</p>
<p>Jardin N. Beitrag im Tagungsband: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche. 66. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik. Schriftenreihe Institut IWAR 147, 2002</p>	<p>Phosphorbilanz bei der Abwasser- und Klärschlammbehandlung.</p>
<p>Kahrs D. &amp; Hermanussen O. Vortrag gehalten bei 9. Klärschlammstage der DWA 15.-17. Juni 2015 in Potsdam</p>	<p>„Thermisch-chemische Hydrolyse – Praxisbeispiel Kläranlage Uelzen“</p>

<p>Kopp J. Vortrag gehalten bei 8. Klärschlammstage der DWA 04.-06. Juni 2013 in Fulda</p>	<p>„Einfluss der Temperatur und der thermischen Hydrolyse auf die Klärschlammmentwässerung“</p>
<p>Kopp J. ÖWAV Klärschlammseminar „Klärschlammwende“ 20./21.11.2014, Wels</p>	<p>„Einfluss der Temperaturführung und thermischer Hydrolyseverfahren auf die Klärschlammmentwässerung“</p>
<p>Merkblatt DWA-M 302 12/2016 <a href="https://webshop.dwa.de/de/merkblatt-dwa-m-302-dezember-2016.html">https://webshop.dwa.de/de/merkblatt-dwa-m-302-dezember-2016.html</a></p>	<p>Klärschlammintegration</p>
<p>Umweltbundesamt Informationspapier 06/2006 <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3097.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3097.pdf</a></p>	<p>Zur Sicherheit bei Biogasanlagen</p>
<p>UBA Texte   156/2022, 12/ 2022 <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2022_abschaetzung_zusaetzlich_aus_abwasser_und_klaerschlaemmen_kommunaler_und_gewerblicher_herkunft_extrahierbarer_wertstoffe.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2022_abschaetzung_zusaetzlich_aus_abwasser_und_klaerschlaemmen_kommunaler_und_gewerblicher_herkunft_extrahierbarer_wertstoffe.pdf</a></p>	<p>Abschätzung zusätzlich aus Abwasser und Klärschlämmen kommunaler und gewerblicher Herkunft extrahierbarer Wertstoffe Abschlussbericht</p>